



Πολυτεχνείο Κρήτης

Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

Υλοποίηση τεχνικής μετάδοσης Alamouti σε SDR testbed

Διπλωματική εργασία του Φιδάνη Ιωάννη

Τριμελής επιτροπή:

Καθ. Λιάβας Αθανάσιος (επιβλέπων)

Επ.Καθ. Καρυστινός Γεώργιος

Επ.Καθ. Μπλέτσας Άγγελος

11 Σεπτεμβρίου 2010

Περίληψη

Τα νέα συστήματα επικοινωνίας απαιτούν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης χωρίς την αύξηση της ισχύος μετάδοσης. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκαν τεχνικές που έχουν σκοπό να οδηγήσουν σε αξιόπιστη επικοινωνία, όπως η αποστολή δεδομένων μέσω ανεξάρτητων καναλιών (διαφοροποίηση – diversity). Μία ενδιαφέρουσα τεχνική για την επίτευξη διαφοροποίησης είναι η χρήση κωδικών διαφοροποίησης χρόνου σε συστήματα πολλαπλών κεραιών (space-time codes). Μέσω της τεχνικής αυτής είναι δυνατή η βελτίωση της απόδοσης του συστήματος μειώνοντας την επίδραση των παρεμβολών και ελαττώνοντας τον συνολικό ρυθμό σφαλμάτων κατά τη μετάδοση. Ο Siavash M. Alamouti ανέπτυξε έναν απλό αλλά αποδοτικό space-time κώδικα για δύο κεραιές εκπομπής και M κεραιές λήψης. Στην παρούσα εργασία, περιγράφεται η υλοποίηση του σχήματος που πρότεινε ο Alamouti για δύο κεραιές εκπομπής και μία κεραιά λήψης σε SDR (Software Defined Radio) συστήματα επικοινωνίας. Με τη χρήση των συστημάτων αυτών, μελετήσαμε τη συμπεριφορά του σχήματος Alamouti σε διάφορα περιβάλλοντα διάδοσης.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	11
2	Ασύρματα Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα	13
2.1	Ασύρματο κανάλι - Διαλείψεις - Διαφοροποίηση	13
2.2	Συνοπτική περιγραφή space - time κώδικα Alamouti	16
2.3	Software Defined Radio - USRPs	17
2.3.1	Software Defined Radio	17
2.3.2	USRPs	17
3	Σχήμα Alamouti	19
3.1	Εισαγωγή	19
3.2	MISO - Alamouti 2x1	20
3.2.1	MISO	20
3.2.2	Alamouti 2x1	20
3.3	MIMO - Alamouti 2x2	23
3.3.1	MIMO	23
3.3.2	Alamouti 2x2	23
3.4	Εκτίμηση καναλιού και διαφοράς συχνότητας φορέα	26
3.4.1	Εκτίμηση καναλιού και CFO στο σχήμα του Alamouti	27

3.5	Συμπεράσματα και αποτελέσματα	29
4	Software-Defined Radio System - USRP boards	31
4.1	Software-Defined Radio System	31
4.1.1	Δομή και λειτουργία	31
4.1.2	RF front end	32
4.1.3	AD - DA Converters	32
4.1.4	Λογισμικό - GNU Radio	33
4.2	USRP boards	33
4.2.1	Δομή και λειτουργία	34
4.2.2	Μητρική κάρτα	34
4.2.3	Θυγατρικές κάρτες	35
4.2.4	FPGA	35
4.2.5	MUX - Πολυπλέκτης	36
5	Πειραματική Διαδικασία	39
5.1	Εισαγωγή	39
5.1.1	Πομπός	40
5.1.2	Δέκτης	40
5.1.3	Αποτελέσματα πειραμάτων	42
6	Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	59

Κατάλογος Πινάκων

3.1	Κατανομή συμβόλων σχήματος Alamouti στον χρόνο ανά κεραία . . .	21
3.2	Κατανομή λαμβανόμενων συμβόλων του Alamouti στον χρόνο ανά κεραία	24
5.1	Πίνακας συσχέτισης καναλιών	57

Κατάλογος Σχημάτων

3.1	Alamouti 2x1	21
3.2	Alamouti 2x2	23
3.3	BER συστημάτων Alamouti 2x1, Alamouti 2x1 και SISO	29
3.4	Καμπύλη BER για Alamouti 2x1 χρησιμοποιώντας τις πραγματικές τιμές των καναλιών και του CFO και χρησιμοποιώντας τις εκτιμήσεις των καναλιών και του CFO	30
4.1	USRP	34
4.2	DDC	36
4.3	MUX	37
5.1	Το μέτρο των καναλιών για όλα τα πακέτα	43
5.2	Διαφορά συχνότητας φορέα	43
5.3	Ιστόγραμμα κατανομής πραγματικών τιμών του καναλιού 1	44
5.4	Ιστόγραμμα κατανομής φανταστικών τιμών του καναλιού 1	44
5.5	Ιστόγραμμα κατανομής πραγματικών τιμών του καναλιού 2	45
5.6	Ιστόγραμμα κατανομής φανταστικών τιμών του καναλιού 2	45
5.7	Το μέτρο των καναλιών για όλα τα πακέτα	46
5.8	Διαφορά συχνότητας φορέα	47
5.9	Ιστόγραμμα κατανομής πραγματικών τιμών του καναλιού 1	47
5.10	Ιστόγραμμα κατανομής φανταστικών τιμών του καναλιού 1	48

5.11	Ιστόγραμμα κατανομής πραγματικών τιμών του καναλιού 2	48
5.12	Ιστόγραμμα κατανομής φανταστικών τιμών του καναλιού 2	49
5.13	Κατανομή Rice για $\sigma_l = 1$ και $k = 100$	50
5.14	Το μέτρο των καναλιών για όλα τα πακέτα	51
5.15	Διαφορά συχνότητας φορέα	51
5.16	Ιστόγραμμα κατανομής πραγματικών τιμών του καναλιού 1	52
5.17	Ιστόγραμμα κατανομής φανταστικών τιμών του καναλιού 1	52
5.18	Ιστόγραμμα κατανομής πραγματικών τιμών του καναλιού 2	53
5.19	Ιστόγραμμα κατανομής φανταστικών τιμών του καναλιού 2	53
5.20	Το μέτρο των καναλιών για όλα τα πακέτα	54
5.21	Διαφορά συχνότητας φορέα	55
5.22	Ιστόγραμμα κατανομής πραγματικών τιμών του καναλιού 1	55
5.23	Ιστόγραμμα κατανομής φανταστικών τιμών του καναλιού 1	56
5.24	Ιστόγραμμα κατανομής πραγματικών τιμών του καναλιού 2	56
5.25	Ιστόγραμμα κατανομής φανταστικών τιμών του καναλιού 2	57
5.26	Πειραματικό BER στα USRPs	58

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η περιγραφή της υλοποίησης ενός συστήματος επικοινωνίας που χρησιμοποιεί περισσότερες από μία κεραιές εκπομπής. Συγκεκριμένα, περιγράφουμε την υλοποίηση του σχήματος του Alamouti για συστήματα με δύο κεραιές στον πομπό και μία κεραιά στο δέκτη. Επίσης, περιγράφουμε τη συμπεριφορά του συστήματος σε περιβάλλοντα διάδοσης με έντονη κινητικότητα στο χώρο αλλά και σε περιβάλλοντα διάδοσης χωρίς καθόλου κινητικότητα στο χώρο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η έννοια του ασύρματου καναλιού αλλά και τα φαινόμενα που συμβάλλουν αρνητικά στη διάδοση του σήματος. Επίσης, προτείνονται τρόποι αντιμετώπισης των φαινομένων αυτών, με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. Τέλος, περιγράφεται συνοπτικά ο τρόπος που πρότεινε ο Alamouti, για την αντιμετώπιση των φαινομένων αλλοίωσης του σήματος, αλλά και τα software-define συστήματα επικοινωνίας, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη συστημάτων επικοινωνίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται το σχήμα του Alamouti για συστήματα με δύο κεραιές εκπομπής και μία κεραιά λήψης. Επιπλέον, αναλύεται και η απλούστερη περίπτωση για συστήματα με πολλές κεραιές στον πομπό και πολλές κεραιές στο δέκτη και συγκεκριμένα το σχήμα που πρότεινε ο Alamouti με δύο κεραιές εκπομπής και δύο κεραιές λήψης. Επίσης, περιγράφεται η μέθοδος για την εκτίμηση των καναλιών διάδοσης του σήματος και η μέθοδος για την εύρεση της διαφοράς συχνότητας φορέα.

Τέλος, τα συστήματα αυτά συγκρίνονται με την απλή περίπτωση όπου το σύστημα έχει μία κεραία στον πομπό και μία στο δέκτη. Η σύγκριση αυτή φανερώνει τη βελτίωση που προσφέρουν τα νέα σχήματα στην απόδοση των συστημάτων επικοινωνίας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος λειτουργίας των software-defined-radio συστημάτων καθώς και οι ευκολίες που προσφέρει η χρήση τους.

Το πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζει τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την πειραματική διαδικασία. Περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος υλοποίησης και τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Τα αποτελέσματα αυτά αναφέρονται στον τρόπο συμπεριφοράς του συστήματος που υλοποιήθηκε με βάση το σχήμα του Alamouti. Το σύστημα δοκιμάστηκε σε περιβάλλοντα διάδοσης με έντονη κινητικότητα αλλά και σε περιβάλλοντα διάδοσης χωρίς καθόλου κινητικότητα για διαφορετικές τιμές ισχύος εκπομπής.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποια συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία και προτείνεται μελλοντική εργασία πάνω στο θέμα αυτό.

Κεφάλαιο 2

Ασύρματα Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα

2.1 Ασύρματο κανάλι - Διαλείψεις - Διαφοροποίηση

Η μετάδοση πληροφορίας μέσω του περιβάλλοντος χώρου με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μεταξύ πομπού και δέκτη καλείται ασύρματη επικοινωνία. Ο ατμοσφαιρικός χώρος αποτελεί το μέσο διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και ορίζει ένα κανάλι το οποίο καλείται ασύρματο κανάλι.

Το ασύρματο κανάλι είναι ευαίσθητο σε διάφορες μορφές θορύβου και σε παρεμβολές που συχνά έχουν ως αποτέλεσμα την αλλοίωση του μεταδιδόμενου σήματος και τελικά την εσφαλμένη ανάκτηση των δεδομένων στο δέκτη.

Οι μηχανισμοί που επηρεάζουν τη διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι η απορρόφηση (absorption), η ανάκλαση (reflection), η περίθλαση (diffraction), η διάθλαση (refraction), και η σκέδαση (scattering). Σε κάθε περίπτωση, παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά τη διάδοση αποτελούν η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη, η μορφολογία του εδάφους και του χώρου, τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας και η σχετική κίνηση του πομπού και του δέκτη.

Πιο συγκεκριμένα, τα φαινόμενα που επηρεάζουν το λαμβανόμενο σήμα σε ένα ασύρματο σύστημα κατηγοριοποιούνται σε:

- φαινόμενα μεγάλης κλίμακας,
- φαινόμενα μικρής κλίμακας.

Τα φαινόμενα μεγάλης κλίμακας καθορίζονται κυρίως από την απόσταση του πομπού και του δέκτη και τη μορφολογία του περιβάλλοντος διάδοσης. Σε αυτά τα φαινόμενα ανήκουν οι απώλειες διαδρομής (path loss) και η σκίαση (shadowing). Οι απώλειες διαδρομής προκαλούνται από την εξασθένηση του σήματος κατά τη διάδοσή του λόγω της απόστασης. Η σκίαση οφείλεται στα εμπόδια μεταξύ του πομπού και του δέκτη (δέντρα, κτίρια, κτλ) και προκαλείται από φαινόμενα όπως η απορρόφηση, η ανάκλαση και η περίθλαση.

Τα φαινόμενα μικρής κλίμακας αφορούν στην περιγραφή των γρήγορων μεταβολών των ασύρματων καναλιών που οφείλονται σε κίνηση του πομπού, του δέκτη ή των εμποδίων που συναντά το σήμα στη διάδοσή του. Στα φαινόμενα μικρής κλίμακας ανήκει η διάλειψη ή εξασθένηση (fading). Η εξασθένηση οφείλεται στη λήψη πολλαπλών εκδοχών του σήματος σε διαφορετικές χρονικές στιγμές εξαιτίας της σκέδασης σε αντικείμενα που συναντά το σήμα κατά τη διάδοσή του. Για το λόγο αυτό η εξασθένηση αυτή καλείται πολυοδική εξασθένηση (multipath fading) και το αντίστοιχο κανάλι καλείται πολυοδικό (multipath channel). Τα πολλαπλά σήματα στο δέκτη φθάνουν με διαφορετικά πλάτη και διαφορετικές φάσεις και από το συνδυασμό τους προκύπτει ένα σήμα το οποίο μπορεί να ποικίλλει τόσο στο πλάτος όσο και στη φάση.

Οι διαλείψεις (fading) προκαλούν σημαντικές απώλειες στην ισχύ του λαμβανόμενου σήματος με αποτέλεσμα να υποβαθμίζεται σημαντικά η απόδοση του συστήματος. Η αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος δεν αποτελεί λύση για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. Ένας πιο αποδοτικός τρόπος είναι η μετάδοση και η λήψη του σήματος μέσω ανεξάρτητων καναλιών. Και αυτό διότι οι ανεξάρτητες διαδρομές υπόκεινται σε ανεξάρτητες διαλείψεις, ώστε τελικά να είναι εφικτή η αξιόπιστη επικοινωνία

εφόσον τουλάχιστον μία από τις διαδρομές είναι ισχυρή. Η τεχνική αυτή καλείται διαφοροποίηση (diversity) και βελτιώνει σημαντικά την απόδοση ενός συστήματος.

Η διαφοροποίηση στα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών μπορεί να επιτευχθεί:

- στο χρόνο,
- στις συχνότητες,
- στο χώρο,
- ή σε συνδυασμό τους.

Πιο συγκεκριμένα, η διαφοροποίηση στο χρόνο επιτυγχάνεται μέσω κωδικοποίησης και διεμπλοκής (interleaving). Τα κωδικοποιημένα σύμβολα διασκορπίζονται στο χρόνο σε διαφορετικές περιόδους συμφωνίας (coherence periods) έτσι ώστε διαφορετικά κομμάτια των κωδικών λέξεων να υφίστανται ανεξάρτητες διαλείψεις.

Σε περιπτώσεις που το κανάλι είναι επιλεκτικό στις συχνότητες (frequency selective) μπορούμε να επιτύχουμε διαφοροποίηση στις συχνότητες μέσω της δυνατότητας διαχωρισμού των πολλών διαδρομών στο δέκτη λόγω της ευρυζωνικής φύσης του καναλιού. Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τις διαφορετικές συχνότητες προς όφελός μας (π.χ. OFDM).

Τέλος, η διαφοροποίηση στο χώρο επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση πολλών κεραιών στον πομπό και στο δέκτη. Αν οι κεραιές τοποθετηθούν σε αρκετή απόσταση μεταξύ τους, το μεταδιδόμενο σήμα υφίσταται ανεξάρτητες διαλείψεις, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ανεξάρτητες διαδρομές σήματος. Η απαιτούμενη απόσταση μεταξύ των κεραιών εξαρτάται από το περιβάλλον σκέδασης καθώς και από τη συχνότητα του φορέα.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα τεχνική για την επίτευξη διαφοροποίησης είναι η χρήση κωδικών διαφοροποίησης χρόνου σε συστήματα πολλών κεραιών και καλείται κωδικοποίηση χώρου-χρόνου (space-time coding). Η τεχνική αυτή βελτιώνει την απόδοση του συστήματος, συντελεί στην αποτελεσματική αντιμετώπιση των διαλείψεων και βελτιώνει το Signal to Noise Ratio (SNR). Η κωδικοποίηση χώρου-χρόνου

(space-time coding) και πιο συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός κωδίκων χώρου-χρόνου (space-time codes), έχει προσελκύσει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον την τελευταία δεκαετία.

Επίσης, σημαντική επίδραση στο λαμβανόμενο σήμα έχει και η παρουσία του θερμικού θορύβου. Η μορφή αυτή του θορύβου οφείλεται στην τυχαία κίνηση των ηλεκτρονίων μέσα στα αγώγιμα υλικά των ηλεκτρικών κυκλωμάτων, και επομένως οφείλεται στις ηλεκτρονικές διατάξεις του δέκτη. Ο θόρυβος αυτός μπορεί να περιγραφεί από το μοντέλο του προσθετικού λευκού Gaussian θορύβου (AWGN).

2.2 Συνοπτική περιγραφή space - time κώδικα Alamouti

Ένα απλό και αποτελεσματικό σχήμα που επιτυγχάνει διαφοροποίηση αναπτύχθηκε από τον Alamouti και κέρδισε γρήγορα έδαφος στο πεδίο των ασύρματων επικοινωνιών. Ο κώδικας Alamouti είναι ένας από τους πιο απλούς και “κομφούς” κώδικες χώρου-χρόνου. Εκμεταλλεύεται τη διαφοροποίηση χώρου και χρόνου και καταφέρνει να βελτιώσει την απόδοση της μετάδοσης του σήματος.

Η βελτίωση της απόδοσης επιτυγχάνεται χωρίς τη χρήση οποιασδήποτε ανατροφοδότησης από το δέκτη στον πομπό και με χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα. Επιπλέον, δεν απαιτείται καμία επέκταση στο εύρος ζώνης της μετάδοσης, καθώς η διαφοροποίηση επιτυγχάνεται μέσω των πολλαπλών κεραιών και όχι στο χρόνο ή στη συχνότητα. Η καινούργια αυτή τεχνική διαφοροποίησης μπορεί να βελτιώσει τη μέση πιθανότητα σφάλματος, το ρυθμό μετάδοσης και τη χωρητικότητα των ασύρματων καναλιών.

Στην πιο απλή του μορφή, ο κώδικας Alamouti είναι σχεδιασμένος για συστήματα με δύο κεραιές εκπομπής και μία κεραία λήψης. Ωστόσο, η τεχνική αυτή μπορεί εύκολα να γενικευθεί για χρήση δύο κεραιών εκπομπής και M κεραιών λήψης.

2.3 Software Defined Radio - USRPs

2.3.1 Software Defined Radio

Το software-defined radio (SDR) αποτελεί ένα σύστημα επικοινωνίας του οποίου οι παράμετροι κωδικοποίησης του μεταδιδόμενου σήματος είναι προσβάσιμες και τροποποιήσιμες μέσω ειδικού λογισμικού (software).

Η ιδέα των SDRs βασίζεται στην υλοποίηση των εξαρτημάτων ενός συστήματος επικοινωνίας (mixers, φίλτρα, ενισχυτές, διαμορφωτές, αποδιαμορφωτές, κτλ) με τη χρήση λογισμικού και όχι με τη χρήση σύνθετων κυκλωμάτων. Διαφορετικοί αλγόριθμοι, είτε για αποστολή είτε για λήψη δεδομένων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν βασισμένοι στο ίδιο υλικό (hardware). Έτσι η επεξεργασία σήματος μπορεί να αλλάξει χωρίς την απαίτηση για αλλαγή του υλικού. Τέτοιου είδους σχεδιασμοί ορίζουν ένα σύστημα επικοινωνίας που μπορεί να μεταδώσει σήματα δεδομένων (κυματομορφές) βασισμένο εξ ολοκλήρου στο λογισμικό.

2.3.2 USRPs

Το USRP (Universal Software Radio Peripheral) αποτελεί ένα προγραμματιζόμενο σύστημα το οποίο έχει σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να εκτελεί λογισμικό που έχει δημιουργηθεί ειδικά με τη βοήθεια των εργαλείων του GNU Radio. Συνδέονται στη USB θύρα του Η/Υ και ο πυρήνας τους είναι ένας FPGA που αναλαμβάνει όλες τις διασυνδέσεις με τον υπολογιστή και με το RF κομμάτι του συστήματος που αποτελείται από ειδικούς πομποδέκτες οι οποίοι μπορούν να ρυθμιστούν κατάλληλα, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής.

Κεφάλαιο 3

Σχήμα Alamouti

3.1 Εισαγωγή

Τα ασύρματα συστήματα νέας γενιάς απαιτούν υψηλή ποιότητα στη μετάδοση δεδομένων, υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, μεγαλύτερη εμβέλεια και αποτελεσματικότητα σε περιβάλλοντα που υφίστανται διαλείψεις (fading). Παράλληλα, τα νέα συστήματα επικοινωνίας (κινητά-φορητές συσκευές) πρέπει να παραμείνουν σε απλή μορφή και να έχουν σχετικά χαμηλό κόστος.

Η βελτίωση της ποιότητας ενός ασύρματου συστήματος σε περιβάλλοντα που υπόκεινται σε multipath fading είναι δύσκολη. Η αύξηση της ισχύος του σήματος μετάδοσης δεν αποτελεί βέλτιστη λύση. Μπορεί μεν να μειώσει τη μέση πιθανότητα σφάλματος,¹ αλλά ο πομπός θα απαιτούσε δυνατούς και ακριβούς ενισχυτές ικανούς να δημιουργήσουν σήματα που θα υπερνικούν τις διαλείψεις, το οποίο όχι μόνο αυξάνει τις παρεμβολές σε γειτονικούς χρήστες, αλλά επίσης κοστίζει και έχει βλαβερές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.

Ωστόσο, η εκμετάλλευση της διαφοροποίησης μειώνει την πιθανότητα σφάλματος

¹ $P_e = \frac{1}{SNR} = \frac{1}{P} = \frac{N_0}{P}$, όπου P η ισχύς του σήματος και N_0 η ισχύς του θορύβου

χωρίς την αύξηση της ισχύος εκπομπής

$$P_{e_diversity} \simeq \frac{1}{SNR^m},$$

όπου m η τάξη διαφοροποίησης.

Επομένως, η χρήση πολλαπλών κεραιών και η εκμετάλλευση της διαφοροποίησης στο χώρο αποτελεί μία πρακτική και αποτελεσματική μέθοδο που συντελεί στη βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων επικοινωνίας. Ένα σχήμα που εκμεταλλεύεται έξυπνα τη χωρική διαφοροποίηση είναι το σχήμα του Alamouti, το οποίο παρουσιάζεται αναλυτικά στη συνέχεια.

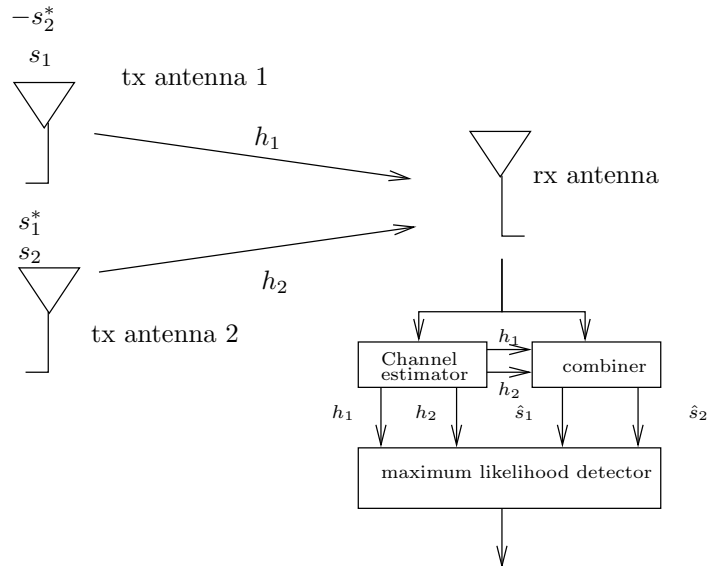
3.2 MISO - Alamouti 2x1

3.2.1 MISO

Τα συστήματα MISO (Multiple Input Single Output) χρησιμοποιούν πολλές κεραιές για την μετάδοση δεδομένων και έτσι εκμεταλλεύονται τη διαφοροποίηση στο χώρο. Τα συγκεκριμένα συστήματα έχουν μία κεραιά για λήψη και πολλές κεραιές για εκπομπή.

3.2.2 Alamouti 2x1

Η κωδικοποίηση Alamouti [4] αποτελεί μια τεχνική εκπομπής η οποία βελτιώνει την ποιότητα του σήματος μέσω σχετικά απλής επεξεργασίας στον πομπό και στη συνέχεια στο δέκτη. Η νέα τοπολογία μετάδοσης που προτείνεται από τον Alamouti αποτελεί ένα MISO σύστημα με δύο κεραιές μετάδοσης και μία κεραιά λήψης (σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Alamouti 2x1

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο, σε κάθε περίοδο συμβόλου στέλνουμε από την κάθε κεραία και διαφορετικό σύμβολο με το χαρακτηριστικό όμως ότι μεταδίδουμε 2 σύμβολα πληροφορίας σε 2 χρονικές στιγμές όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα, με s_1, s_2 τα σύμβολα πληροφορίας για τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές [4]

	χρονική στιγμή 1	χρονική στιγμή 2
κεραία 1	s_1	$-s_2^*$
κεραία 2	s_2	s_1^*

Πίνακας 3.1: Κατανομή συμβόλων σχήματος Alamouti στον χρόνο ανά κεραία

Παρατηρούμε ότι η κωδικοποίηση γίνεται και στο χώρο και στο χρόνο (space-time coding). Οι διαλείψεις μπορούν να αναπαρασταθούν από τη μιγαδική τιμή h_1 για το πρώτο κανάλι και h_2 για το δεύτερο και θεωρούνται σταθερές για τις δύο χρονικές περιόδους. Επομένως, τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές στο δέκτη λαμβάνουμε [2]

$$r_1 = h_1 s_1 + h_2 s_2 + n_1$$

$$r_2 = h_2 s_1^* - h_1 s_2^* + n_2$$

όπου $n_i \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$ ο προσθετικός θόρυβος. Συνεπώς

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2^* \end{bmatrix}$$

ή ισοδύναμα

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}.$$

Το διάνυσμα \mathbf{n} αντιπροσωπεύει τον προσθετικό θόρυβο ενώ ο πίνακας \mathbf{H} ονομάζεται πίνακας καναλιού.

Χρησιμοποιώντας τα r_1 και r_2 καθώς και τη γνώση των h_1 και h_2 που είτε γνωρίζουμε είτε έχουμε εκτιμήσει στο δέκτη, μπορούμε να αποφασίσουμε για τα s_1 και s_2 . Μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι τα διανύσματα

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2^* \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} h_2 \\ -h_1^* \end{bmatrix}$$

είναι κάθετα μεταξύ τους. Ορίζουμε $\mathbf{h} := [h_1 \ h_2]^T$ και

$$\begin{aligned} \hat{s}_1 &:= \frac{1}{\|\mathbf{h}\|} \begin{bmatrix} h_1^* & h_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2^* \end{bmatrix} = \frac{1}{\|\mathbf{h}\|} \begin{bmatrix} h_1^* & h_2 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2^* \end{bmatrix} s_1 + \begin{bmatrix} h_2 \\ -h_1^* \end{bmatrix} s_2 + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2^* \end{bmatrix} \right) = \\ &= \|\mathbf{h}\| s_1 + \hat{n}_1, \quad \hat{n}_1 \sim \mathcal{CN}(0, N_0) \end{aligned}$$

και

$$\begin{aligned} \hat{s}_2 &:= \frac{1}{\|\mathbf{h}\|} \begin{bmatrix} h_2^* & -h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2^* \end{bmatrix} = \frac{1}{\|\mathbf{h}\|} \begin{bmatrix} h_2^* & -h_1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2^* \end{bmatrix} s_1 + \begin{bmatrix} h_2 \\ -h_1^* \end{bmatrix} s_2 + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2^* \end{bmatrix} \right) = \\ &= \|\mathbf{h}\| s_2 + \hat{n}_2, \quad \hat{n}_2 \sim \mathcal{CN}(0, N_0). \end{aligned}$$

Συνεπώς, αν τα s_1 και s_2 είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, τότε μπορούμε να αποφασίσουμε ανεξάρτητα για το s_1 και το s_2 βασιζόμενοι στα \hat{s}_1 και \hat{s}_2 , αντίστοιχα.

Η απόφαση στηρίζεται στον ανιχνευτή μέγιστης πιθανοφάνειας, από τον οποίο προκύπτει η πιθανότερη ακολουθία συμβόλων σύμφωνα με το κριτήριο της ευκλείδειας απόστασης.

Ο κώδικας του Alamouti για συστήματα 2 κεραιών εκπομπής και μίας κεραιάς λήψης χρησιμοποιεί 2 ανεξάρτητα κανάλια για τη μετάδοση της πληροφορίας και επομένως προσφέρει τάξη διαφοροποίησης 2.

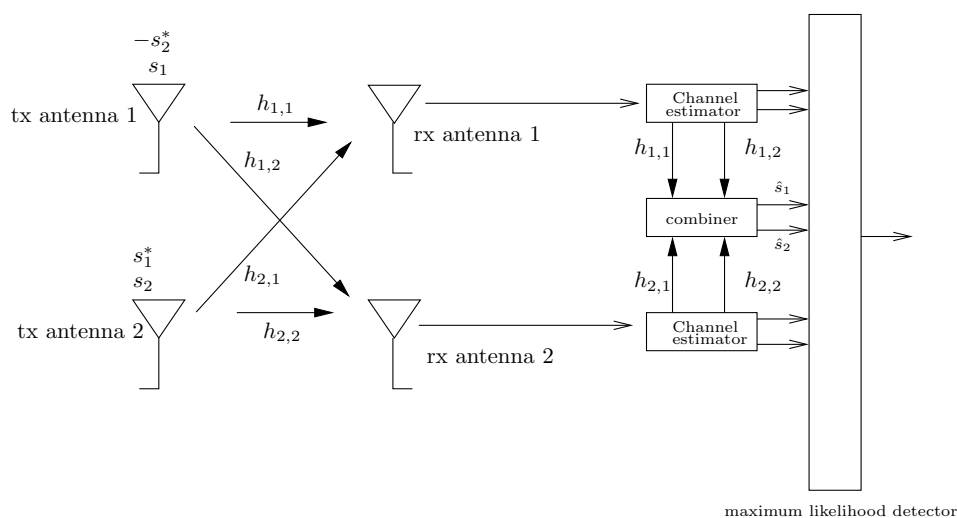
3.3 MIMO - Alamouti 2x2

3.3.1 MIMO

Τα συστήματα MIMO (Multiple Input Multiple Output) όπως και τα MISO χρησιμοποιούν πολλές κεραιές για τη μετάδοση δεδομένων με τη διαφορά ότι τα πρώτα έχουν πολλές κεραιές και για λήψη.

3.3.2 Alamouti 2x2

Ο κώδικας του Alamouti [4] μπορεί να γενικευθεί σε περιπτώσεις με 2 κεραιές εκπομπής και M κεραιές λήψης (MIMO).



Σχήμα 3.2: Alamouti 2x2

Η πιο απλή περίπτωση εφαρμογής του σχήματος Alamouti σε MIMO συστήματα είναι η περίπτωση με 2 κεραίες για αποστολή και 2 κεραίες για λήψη (σχήμα 3.2).

Η κωδικοποίηση των συμβόλων εκπομπής είναι ίδια με την προηγούμενη περίπτωση της μιας κεραίας λήψης ενώ τα λαμβανόμενα σύμβολα σε αντιστοιχία με τις χρονικές στιγμές και τις κεραίες λήψης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα [4]

	κεραία λήψης 1	κεραία λήψης 2
χρονική στιγμή 1	$r_{1,1}$	$r_{2,1}$
χρονική στιγμή 2	$r_{1,2}$	$r_{2,2}$

Πίνακας 3.2: Κατανομή λαμβανόμενων συμβόλων του Alamouti στον χρόνο ανά κεραία

Αν υποθέσουμε ότι τα κανάλια που συνδέουν ζεύγη κεραιών στον πομπό με το δέκτη είναι flat fading, και ορίζοντας ως $h_{i,j}$ το κανάλι από την i -οστή κεραία εκπομπής και j -οστή κεραία λήψης, τότε το σύστημα εισόδου-εξόδου για την πρώτη χρονική στιγμή, περιγράφεται από τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} r_{1,1} \\ r_{2,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} \\ h_{1,2} & h_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{1,1} \\ n_{2,1} \end{bmatrix}$$

ενώ για τη δεύτερη χρονική στιγμή:

$$\begin{bmatrix} r_{1,2} \\ r_{2,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} \\ h_{1,2} & h_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -s_2^* \\ s_1^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{1,2} \\ n_{2,2} \end{bmatrix}$$

όπου $n_{i,j} \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$ ο προσθετικός θόρυβος. Συνεπώς

$$\begin{bmatrix} r_{1,1} \\ r_{1,2}^* \\ r_{2,1} \\ r_{2,2}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1}s_1 + h_{2,1}s_2 \\ h_{2,1}^*s_1 - h_{1,1}^*s_2 \\ h_{1,2}s_1 + h_{2,2}s_2 \\ h_{2,2}^*s_1 - h_{1,2}^*s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{1,1} \\ n_{1,2}^* \\ n_{2,1} \\ n_{2,2}^* \end{bmatrix}.$$

Χρησιμοποιώντας τις τιμές των $r_{i,j}$ καθώς και τις τιμές των καναλιών $h_{i,j}$ που είτε γνωρίζουμε είτε έχουμε εκτιμήσει στο δέκτη, αποφασίζουμε για τα s_1 και s_2 . Μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι τα διανύσματα:

$$\begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1}^* & h_{1,2} & h_{2,2}^* \end{bmatrix}^T, \begin{bmatrix} h_{2,1} & -h_{1,1}^* & h_{2,2} & -h_{1,2}^* \end{bmatrix}^T$$

είναι κάθετα μεταξύ τους. Ορίζουμε $\mathbf{h} := [h_{1,1} \ h_{1,2} \ h_{2,1} \ h_{2,2}]^T$ και:

$$\begin{aligned} \hat{s}_1 &:= \frac{1}{\|\mathbf{h}\|} \begin{bmatrix} h_{1,1}^* & h_{2,1} & h_{1,2}^* & h_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{1,1} \\ r_{1,2}^* \\ r_{2,1} \\ r_{2,2}^* \end{bmatrix} = \\ &= \frac{1}{\|\mathbf{h}\|} \begin{bmatrix} h_{1,1}^* & h_{2,1} & h_{1,2}^* & h_{2,2} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} h_{1,1} \\ h_{2,1}^* \\ h_{1,2} \\ h_{2,2}^* \end{bmatrix} s_1 + \begin{bmatrix} h_{2,1} \\ -h_{1,1}^* \\ h_{2,2} \\ -h_{1,2}^* \end{bmatrix} s_2 + \begin{bmatrix} n_{1,1} \\ n_{1,2}^* \\ n_{2,1} \\ n_{2,2}^* \end{bmatrix} \right) = \\ &= \|\mathbf{h}\| s_1 + \hat{n}_1, \quad \hat{n}_1 \sim \mathcal{CN}(0, N_0) \end{aligned}$$

και

$$\begin{aligned} \hat{s}_2 &:= \frac{1}{\|\mathbf{h}\|} \begin{bmatrix} h_{2,1}^* & -h_{1,1} & h_{2,2}^* & -h_{1,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{1,1} \\ r_{1,2}^* \\ r_{2,1} \\ r_{2,2} \end{bmatrix} = \\ &= \frac{1}{\|\mathbf{h}\|} \begin{bmatrix} h_{2,1}^* & -h_{1,1} & h_{2,2}^* & -h_{1,2} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} h_{1,1} \\ h_{2,1}^* \\ h_{1,2} \\ h_{2,2}^* \end{bmatrix} s_1 + \begin{bmatrix} h_{2,1} \\ -h_{1,1}^* \\ h_{2,2} \\ -h_{1,2}^* \end{bmatrix} s_2 + \begin{bmatrix} n_{1,1} \\ n_{1,2}^* \\ n_{2,1} \\ n_{2,2}^* \end{bmatrix} \right) = \\ &= \|\mathbf{h}\| s_2 + \hat{n}_2, \quad \hat{n}_2 \sim \mathcal{CN}(0, N_0). \end{aligned}$$

Συνεπώς, αν τα s_1 και s_2 είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, τότε μπορούμε να αποφασίσουμε ανεξάρτητα για το s_1 και το s_2 βασιζόμενοι στα \hat{s}_1 και \hat{s}_2 , αντίστοιχα. Η απόφαση στηρίζεται στον ανιχνευτή μέγιστης πιθανοφάνειας, από τον οποίο προκύπτει η πιθανότερη ακολουθία συμβόλων σύμφωνα με το κριτήριο της ευκλείδειας απόστασης.

Είναι άξιον αναφοράς το γεγονός ότι ο συνδυασμός των σημάτων που προκύπτει για την περίπτωση συστήματος με δυο κεραιές λήψης προκύπτει από απλή πρόσθεση των λαμβανόμενων σημάτων από κάθε κεραία. Δηλαδή, χρησιμοποιείται η ίδια διάταξη combiner με την περίπτωση συστήματος με μια κεραία λήψης.

Ο κώδικας του Alamouti για συστήματα 2 κεραιών εκπομπής και 2 κεραιών λήψης χρησιμοποιεί 4 ανεξάρτητα κανάλια για τη μετάδοση της πληροφορίας και προσφέρει τάξη διαφοροποίησης 4. Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι χρησιμοποιώντας δυο κεραιές στο δέκτη, διπλασιάζεται η τάξη διαφοροποίησης του συστήματος σε σχέση με το αντίστοιχο σύστημα με μια κεραία λήψης και συνεπώς βελτιώνεται η απόδοση της μετάδοσης.

3.4 Εκτίμηση καναλιού και διαφοράς συχνότητας φορέα

Σημαντική αλλοίωση στο σήμα εισάγει το κανάλι (channel) και η παρουσία της διαφοράς συχνότητας φορέα (carrier frequency offset, CFO) κατά την αποδιαμόρφωση στο δέκτη. Αφού ληφθεί το σήμα στο δέκτη, πρέπει να υπολογίσουμε τις τιμές των στοιχείων αυτών.

Η παρουσία του CFO οφείλεται στην αποδιαμόρφωση του λαμβανόμενου σήματος στον δέκτη με τοπικούς φορείς:

$$2\cos(2\pi(F_c + \Delta F)t + \phi)$$

και

$$2\sin(2\pi(F_c + \Delta F)t + \phi).$$

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα κατά την αποδιαμόρφωση να προκύψουν όροι συχνότητας ΔF και $2F_c + \Delta F$. Οι δεύτεροι θα κοπούν από το προσαρμοσμένο φίλτρο και συνεπώς τους αγνοούμε. Ωστόσο, η διαφορά ΔF είναι ικανή να προκαλέσει σφάλματα κατά την ανάκτηση των δεδομένων και για το λόγο αυτό πρέπει να αναιρεθεί. Η αναιρέση του CFO γίνεται πολλαπλασιάζοντας το σήμα με ένα αντίστοιχο μιγαδικό εκθετικό.

3.4.1 Εκτίμηση καναλιού και CFO στο σχήμα του Alamouti

Αν υποθέσουμε ότι δεν υπάρχει CFO, τότε το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης έχει την εξής μορφή:

$$r_k = h_1 s_k + h_2 s_{k+1} + n_k, \quad k = 1, 3, 5, \dots, N_{tr} - 1$$

$$r_k = h_2 s_{k-1}^* - h_1 s_k^* + n_k, \quad k = 2, 4, 6, \dots, N_{tr}$$

ή σε μορφή πινάκων:

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_{N_{tr}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \\ \vdots & \vdots \\ -s_{N_{tr}}^* & s_{N_{tr}-1}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_{N_{tr}} \end{bmatrix}$$

ή ισοδύναμα

$$\mathbf{r} = \mathbf{S}\mathbf{h} + \mathbf{n}$$

όπου N_{tr} το μέγεθος της ακολουθίας των συμβόλων εκπαίδευσης θεωρώντας πρώτο σύμβολο εκπαίδευσης το σύμβολο s_1 .

Όταν υπάρχει CFO, τότε

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_{N_{tr}} \end{bmatrix} = \Gamma(v) \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \\ \vdots & \vdots \\ -s_{N_{tr}}^* & s_{N_{tr}-1}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_{N_{tr}} \end{bmatrix}$$

ή ισοδύναμα:

$$\mathbf{r} = \mathbf{\Gamma}(v) \mathbf{S} \mathbf{h} + \mathbf{n}$$

όπου $\mathbf{\Gamma}(v) = \text{diag}\{1, e^{j2\pi v}, e^{j4\pi v}, \dots, e^{j2\pi(N_{tr}-1)v}\}$, $v = \Delta FT$ η διαφορά συχνότητας που επηρεάζει τη διάταξη και T η περίοδος συμβόλου. Ο βασικός στόχος είναι να εκτιμήσουμε το v και να το αναιρέσουμε.

Μπορεί να αποδειχθεί [3] ότι για να υπολογίσουμε τη διαφορά της συχνότητας v αρκεί να βρεθεί το σημείο μεγιστοποίησης της συνάρτησης $g(v) = \mathbf{r}^H \mathbf{\Gamma}(\tilde{v}) \mathbf{B} \mathbf{\Gamma}^H(\tilde{v}) \mathbf{r}$, δηλαδή:

$$\hat{v} := \arg \max_{\tilde{v}} \{g(\tilde{v})\}$$

όπου $\mathbf{B} = \mathbf{S}(\mathbf{S}^H \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^H$.

Αφού εκτιμήσουμε τη διαφορά στη συχνότητα, συνεχίζουμε με το κανάλι το οποίο εκτιμάται με τη σχέση:

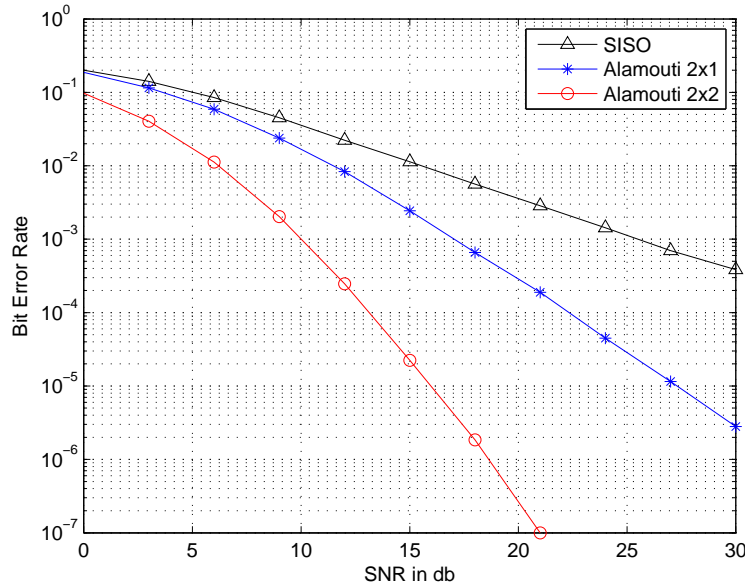
$$\hat{\mathbf{h}}(\hat{v}) = (\mathbf{S}^H \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^H \mathbf{\Gamma}^H(\hat{v}) \mathbf{r}.$$

Τέλος, μετά την εκτίμηση των καναλιών, αναιρούμε την παρεμβολή του CFO πολλαπλασιάζοντας το λαμβανόμενο σήμα με το εκθετικό σήμα: $e^{-j2\pi\hat{v}k}$, $k = 1, \dots, N$, όπου N το μέγεθος της λαμβανόμενης ακολουθίας.

Έχοντας πλέον αναιρέσει τη διαφορά συχνότητας και γνωρίζοντας τις εκτιμώμενες τιμές του καναλιού, μπορούμε να προχωρήσουμε στην ανάκτηση των δεδομένων που έλαβε ο δέκτης.

3.5 Συμπεράσματα και αποτελέσματα

Ο ρυθμός εσφαλμένων bits (Bit Error Rate, BER) μπορεί να θεωρηθεί ως μέτρο για την απόδοση των συστημάτων επικοινωνίας.



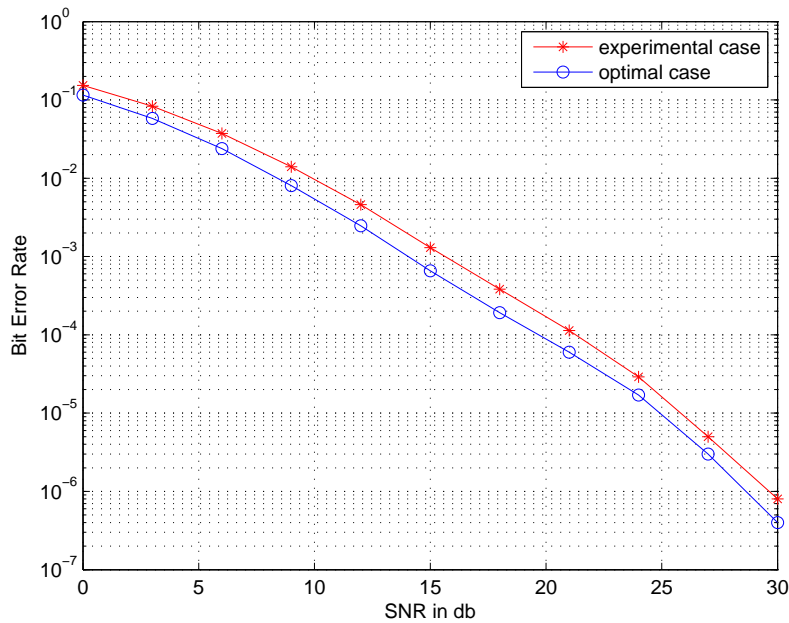
Σχήμα 3.3: BER συστημάτων Alamouti 2x1, Alamouti 2x1 και SISO

Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η καμπύλη BER συναρτήσει του σηματοθρομβικού λόγου (SNR) για τα συστήματα του Alamouti 2x1, Alamouti 2x2 αλλά και για την απλή περίπτωση χωρίς την εκμετάλλευση της χωρικής διαφοροποίησης (μία κεραία για εκπομπή και μία κεραία για λήψη, SISO (Single Input Single Output)). Για την προσομοίωση των καμπυλών χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα της Matlab με τις τιμές των καναλιών να ακολουθούν Rayleigh κατανομή.

Στο σχήμα αυτό είναι εμφανής η βελτίωση που επιτυγχάνεται με τη χρήση κωδικοποίησης Alamouti καθώς ο αριθμός των σφαλμάτων μειώνεται σημαντικά με την αύξηση του SNR. Στο παραπάνω διάγραμμα θεωρούμε ότι δεν υπάρχει διαφορά στη συχνότητα αποδιαμόρφωσης του δέκτη και ότι γνωρίζουμε τις τιμές των καναλιών.

Στη συνέχεια θεωρούμε την περίπτωση που εκτιμούμε το κανάλι και το CFO. Στο σχήμα 3.4 η καμπύλη optimal BER αντιστοιχεί στην περίπτωση που γνωρίζουμε

τις τιμές των καναλιών αλλά και την τιμή της διαφοράς στη συχνότητα φορέα, ενώ η καμπύλη experimental BER αντιστοιχεί στην περίπτωση που εκτιμάται η διαφορά φάσης αλλά και οι τιμές των καναλιών. Για την προσομοίωση των καμπυλών χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα της Matlab με τις τιμές των καναλιών να ακολουθούν Rayleigh κατανομή.



Σχήμα 3.4: Καμπύλη BER για Alamouti 2x1 χρησιμοποιώντας τις πραγματικές τιμές των καναλιών και του CFO και χρησιμοποιώντας τις εκτιμήσεις των καναλιών και του CFO

Παρατηρούμε ότι η καμπύλη BER για την περίπτωση που εκτιμούμε τη διαφορά συχνότητας φορέα και τα κανάλια έχει μία μικρή απόκλιση από την αντίστοιχη περίπτωση που έχουμε γνώση των τιμών αυτών. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στα σφάλματα εκτίμησης.

Κεφάλαιο 4

Software-Defined Radio System - USRP boards

4.1 Software-Defined Radio System

Το software-defined radio, αποτελεί ένα σύστημα επικοινωνίας το οποίο μπορεί να συντονιστεί σε ποικίλες συχνότητες και να λάβει δεδομένα με τη χρήση υλικού το οποίο ελέγχεται από λογισμικό.

Η βασική ιδέα είναι η χρησιμοποίηση λογισμικού για την υλοποίηση πολλών διατάξεων (διαμορφωτές, αποδιαμορφωτές, κτλ) σε αντίθεση με τα παραδοσιακά συστήματα που χρησιμοποιούν σύνθετα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Διαφορετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται στο ίδιο υλικό για να υλοποιηθούν διαφορετικά συστήματα επικοινωνίας, χωρίς την απαίτηση αλλαγής του υλικού.

Η ευκολία που προσφέρει το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα για τη δημιουργία του μεταδιδόμενου σήματος στον πομπό αλλά και τη δυνατότητα της επεξεργασίας του σήματος στο δέκτη.

4.1.1 Δομή και λειτουργία

Μια τυπική διαδικασία λήψης έχει την εξής μορφή [5]:

Κεραία \rightarrow RF front end \rightarrow ADC \rightarrow Λογισμικό

ενώ μια τυπική διαδικασία μετάδοσης έχει την εξής μορφή:

Λογισμικό \rightarrow DAC \rightarrow RF front end \rightarrow Κεραία.

4.1.2 RF front end

Η διάταξη RF front end [7] βρίσκεται ανάμεσα στις κεραίες και στους μετατροπείς του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό και αντίστροφα. Πιο συγκεκριμένα, στο δέκτη η διάταξη αυτή καθιστά το σήμα ικανό για χρήση από τους ADCs ενώ στον πομπό προετοιμάζει το σήμα για αποστολή.

4.1.3 AD - DA Converters

ADC

Ο μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ή ADC (analog to digital converters) είναι η γέφυρα μεταξύ του κόσμου των συνεχών αναλογικών σημάτων και του κόσμου των διακριτών ψηφιακών σημάτων. Η λειτουργία ενός ADC είναι η μετατροπή του σήματος από συνεχές σε διακριτό, δηλαδή σε μια ακολουθία από αριθμούς που εισέρχονται στον υπολογιστή και μπορούν να επεξεργαστούν στη συνέχεια από το λογισμικό. Οι ADC έχουν δύο βασικά χαρακτηριστικά: το ρυθμό δειγματοληψίας (sampling rate) και το δυναμικό εύρος (dynamic range).

Ο ρυθμός δειγματοληψίας αναφέρεται στον αριθμό δειγμάτων ανά δευτερόλεπτο που ο μετατροπέας διαβάζει από το εισερχόμενο σήμα. Η έξοδος του ADC θα περιέχει τις τιμές του σήματος στις αντίστοιχες στιγμές δειγματοληψίας.

Το δυναμικό εύρος αναφέρεται στη διαφορά ανάμεσα στο μικρότερο και στο μεγαλύτερο σήμα που μπορεί να γίνει διάκριση. Είναι μία συνάρτηση η οποία δίνει στην έξοδο τα επίπεδα του σήματος ανάλογα με τη διάταξη που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα ένας μετατροπέας των 8bit μπορεί να δώσει $2^8 = 256$ τιμές σήματος ενώ ένας μετατροπέας των 16bit μπορεί να δώσει $2^{16} = 65536$ τιμές.

DAC

Αντίστοιχη είναι και η λειτουργία του μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό σήματος (DAC) με τη διαφορά ότι τα διακριτά σήματα μετατρέπονται σε σήματα συνεχούς χρόνου με τη μέθοδο του interpolation.

4.1.4 Λογισμικό - GNU Radio

Το GNU Radio [5] αποτελεί ένα λογισμικό για προγραμματισμό SDR συστημάτων. Παρέχει τη δυνατότητα για τη δημιουργία blocks με σκοπό την επεξεργασία του σήματος και τη σύνδεση αυτών για την ολοκλήρωση του συστήματος.

Η διαδικασία του προγραμματισμού μπορεί να παρομοιαστεί με τη δημιουργία ενός γράφου του οποίου οι ακμές αντιπροσωπεύουν τη ροή των δεδομένων και οι κορυφές αντιπροσωπεύουν τα blocks της επεξεργασίας του σήματος.

Κάθε block έχει έναν αριθμό από εισόδους και εξόδους ή μόνο εισόδους ή μόνο εξόδους. Τα blocks με μόνο εισόδους ή εξόδους χρησιμοποιούνται ως πηγές δεδομένων ή καταβόθρες, αντίστοιχα. Υπάρχουν πηγές που διαβάζουν δεδομένα από τους ADC και καταβόθρες που γράφουν σε αρχεία, δίνουν δεδομένα σε DAC ή ακόμα και σε μονάδες γραφικής απεικόνισης.

Το GNU radio διαθέτει πολλά blocks με έτοιμα κομμάτια κώδικα που βοηθούν στην επεξεργασία του σήματος αλλά η δημιουργία ενός νέου δεν είναι δύσκολο να επιτευχθεί. Για τη δημιουργία τους χρησιμοποιείται η γλώσσα προγραμματισμού C++ ενώ για τη δημιουργία των γράφων και τη σύνδεση των blocks χρησιμοποιείται η πλατφόρμα της python.

4.2 USRP boards

Σε ένα SDR σύστημα, το υλικό πρέπει να λειτουργεί για κάθε πρόγραμμα που δημιουργείται για αυτό. Οι διατάξεις των USRPs [6] δίνουν στο χρήστη τη δυνατότητα επαναπρογραμματισμού του υλικού τους.

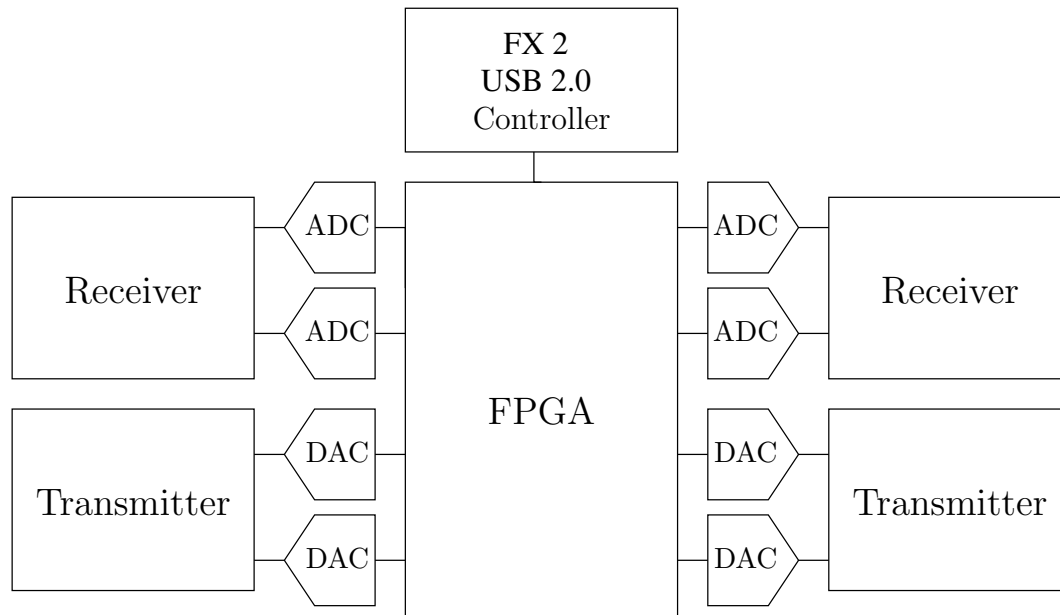
Τα USRPs αποτελούν ένα ενιαίο σύστημα από ADCs και DACs, από μεταφραστές συχνότητων (RF front end) και μία FPGA η οποία κάνει υπολογισμούς σχετικά με την προ-επεξεργασία του σήματος. Χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με το GNU Radio αφού τα συγκεκριμένα συστήματα υλικού έχουν σχεδιαστεί ολοκληρωτικά για να χρησιμοποιούν το λογισμικό αυτό.

4.2.1 Δομή και λειτουργία

Η τυπική διάταξη του υλικού αποτελείται από μία μητρική κάρτα (mother board) και έως δύο θυγατρικές ή δευτερεύουσες κάρτες (daughter boards).

4.2.2 Μητρική κάρτα

Στη μητρική κάρτα [6] βρίσκεται η τροφοδοσία ρεύματος της μονάδας, η υποδοχή της θύρας USB 2.0 (universal serial bus) για τη διασύνδεση της διάταξης με οποιονδήποτε ηλεκτρονικό υπολογιστή, η FPGA και ένας πολυπλέκτης για την επιλογή των ADCs ή DACs που θα χρησιμοποιηθούν.



Σχήμα 4.1: USRP

Επίσης στη μητρική κάρτα υπάρχουν 4 υψηλής ταχύτητας ADCs των 12bit για την περίπτωση της λήψης δεδομένων. Ο ρυθμός δειγματοληψίας των ADCs είναι στα $64M \frac{\text{samples}}{\text{sec}}$ και μπορούν να ψηφιοποιήσουν σήματα εύρους 32MHz. Σε περιπτώσεις σημάτων με εύρος μεγαλύτερο από 32MHz παρατηρείται το φαινόμενο της αλλοίωσης (aliasing). Για την περίπτωση της αποστολής δεδομένων υπάρχουν 4 υψηλής ταχύτητας DACs των 14bit. Η συχνότητα δειγματοληψίας αυτών, είναι $128M \frac{\text{samples}}{\text{sec}}$ και επομένως η συχνότητα Nyquist είναι στα 64MHz.

4.2.3 Θυγατρικές κάρτες

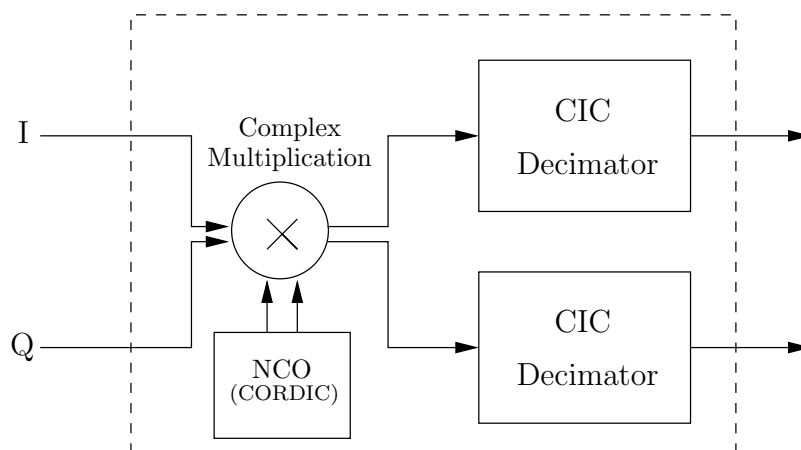
Στην μητρική κάρτα υπάρχουν 4 υποδοχές στις οποίες μπορούν να εφαρμοστούν 2 θυγατρικές κάρτες για αποστολή (TX) και λήψη (RX). Οι υποδοχές για τις κάρτες μετάδοσης έχουν ονομαστεί *TXA* και *TXB* αντίστοιχα ενώ οι υποδοχές για τις κάρτες λήψης έχουν ονομαστεί *RXA* και *RXB* αντίστοιχα. Κάθε θυγατρική κάρτα έχει πρόσβαση σε 2 από τους 4 υψηλής ταχύτητας ADCs και DACs. Αυτό επιτρέπει τη χρήση 2 ανεξάρτητων κεραιών. Έτσι δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας διατάξεων που εκμεταλλεύονται τη χωρική διαφοροποίηση [6].

4.2.4 FPGA

Ο βασικός σκοπός της FPGA (Field Programmable Gate Array) [6] είναι να εκτελεί υπολογιστικές πράξεις και να μειώνει τον ρυθμό των δεδομένων έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η θύρα USB για την επικοινωνία μέσω του υπολογιστή. Η FPGA είναι πλήρως προγραμματιζόμενη μέσω της θύρας USB.

Η διαμόρφωση μιας μονάδας FPGA περιλαμβάνει τις μονάδες DDC (Digital Down Converters) αποτελούμενες από φίλτρα CIC (Cascaded Integrator-Comb). Τα φίλτρα αυτά έχουν υψηλή απόδοση και χρησιμοποιούνται μόνο για προσθέσεις και καθυστερήσεις.

Οι μονάδες DDC (σχήμα 3.2) χρησιμοποιούνται κατά τη λήψη ενός σήματος και η βασική λειτουργία τους είναι ότι μετατρέπουν ένα ψηφιοποιημένο πραγματικό σήμα



Σχήμα 4.2: DDC

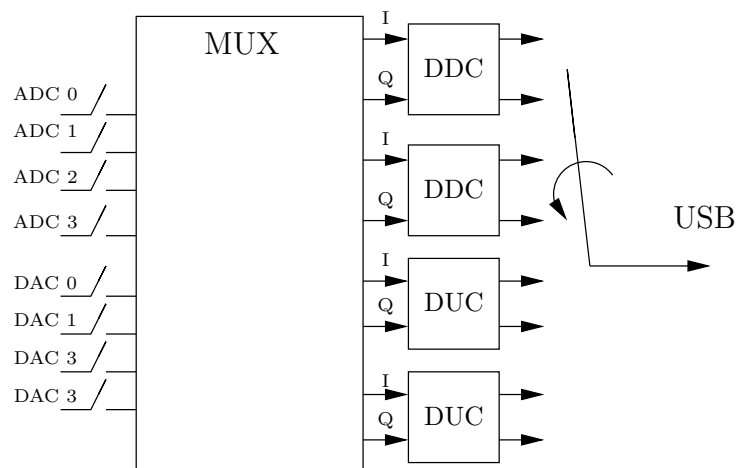
σε ένα σήμα βασικής ζώνης (basebanded complex signal).

Επίσης, οι μονάδες αυτές μειώνουν αρκετά το ρυθμό δειγματοληψίας με σκοπό η επεξεργασία του σήματος να μπορεί να γίνει και από υπολογιστές χαμηλής ταχύτητας. Τα δεδομένα εισόδου σε μια μονάδα DDC είναι τα δεδομένα εξόδου από έναν ADC.

Στο συνολικό σύστημα υπάρχουν και οι μονάδες DUC (Digital Up Converters), οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά τη μετάδοση ενός σήματος και οι οποίες δεν περιλαμβάνονται στη μονάδα FPGA αλλά σε ξεχωριστό ολοκληρωμένο κύκλωμα. Τα δεδομένα εισόδου σε μια μονάδα DUC, είναι τα δεδομένα εξόδου από έναν DAC και η λειτουργία της είναι η αντίστροφη από αυτή μιας μονάδας DDC.

4.2.5 MUX - Πολυπλέκτης

Ο πολυπλέκτης (MUX) επιλέγει ποιος ADC ή DAC (για λήψη ή αποστολή αντίστοιχα) είναι συνδεδεμένος με την αντίστοιχη μονάδα DDC ή DUC. Η διαχείριση του πολυπλέκτη γίνεται μέσω της εντολής: `usrp.set_mux()` σε περιβάλλον Python. Η τιμή που δέχεται ο πολυπλέκτης είναι μία τιμή των 32bit η οποία δείχνει ποιος μετατροπέας είναι συνδεδεμένος.



Σχήμα 4.3: MUX

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε περισσότερα του ενός καναλιού, τα σήματα πρέπει να υποστούν διεμπλοκή στο χρόνο (interleaving). Τα USRPs μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για αμφίδρομη επικοινωνία. Στην περίπτωση αυτή η πλευρά του πομπού και η πλευρά του δέκτη συμπεριφέρονται ανεξάρτητα. Ωστόσο, η αμφίδρομη επικοινωνία δεν θα μας απασχολήσει καθόλου.

Κεφάλαιο 5

Πειραματική Διαδικασία

5.1 Εισαγωγή

Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει την υλοποίηση του σχήματος του Alamouti με χρήση των διατάξεων των USRPs και του λογισμικού του GNU Radio. Η υλοποίηση περιλαμβάνει το σχήμα MISO με χρήση 2 κεραιών στον πομπό και μία κεραία στο δέκτη (Alamouti 2x1). Επίσης, στη διαδικασία των πειραμάτων περιλαμβάνεται και η μελέτη της συμπεριφοράς συστήματος επικοινωνίας σε διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης (με πολλά ενδιάμεσα εμπόδια ή χωρίς εμπόδια).

Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει ξεχωριστούς κώδικες για τον πομπό και για το δέκτη, καθώς χρησιμοποιούμε διαφορετικές συσκευές για την κάθε διάταξη. Η επεξεργασία του σήματος γίνεται στην πλατφόρμα της matlab αλλά σε συνεργασία με το GNU radio για να μπορούν οι συσκευές να διαβάσουν τα δεδομένα.

Στον πομπό δημιουργείται το σήμα για την αποστολή το οποίο πρέπει να βρίσκεται στην κατάλληλη μορφή έτσι ώστε να είναι δυνατή η ανάγνωσή του από τα USRPs. Το αρχείο αυτό αποθηκεύεται στον υπολογιστή και διαβάζεται από το GNU radio με τη χρήση της Python και, τέλος, μεταφέρεται στη συσκευή αποστολής.

Στο δέκτη, το εισερχόμενο σήμα αποθηκεύεται επίσης στον υπολογιστή και στη συνέχεια δέχεται την απαιτούμενη επεξεργασία με χρήση της matlab.

Τα πειράματα διεξήχθησαν στον χώρο του εργαστηρίου και οι συσκευές ήταν τοποθετημένες σε διαφορετικά δωμάτια. Παρακάτω αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας για την κάθε διάταξη.

5.1.1 Πομπός

Στη διάταξη του πομπού δημιουργείται το σήμα προς αποστολή. Εν συνεχεία, γίνεται ο διαχωρισμός για το τι ακριβώς θα στείλει η κάθε κεραία με βάση το σήμα και την κωδικοποίηση που πρότεινε ο Alamouti.

Ωστόσο, τα δεδομένα πρέπει να έχουν συγκεκριμένη θέση στη συνολική ακολουθία για να μπορέσουν να διαβαστούν σωστά από τα USRPs. Θα πρέπει να διαχωριστεί το πραγματικό από το φανταστικό μέρος, αλλά και να τοποθετηθούν τα σύμβολα της κάθε κεραίας διαδοχικά ανά περίοδο χρόνου (να γίνει interleaving). Δηλαδή, το διάλυμα αποστολής θα πρέπει να έχει την ακόλουθη μορφή:

$$[\Re(s_1), \Im(s_1), \Re(s_2), \Im(s_2), \Re(-s_2^*), \Im(-s_2^*), \Re(s_1^*), \Im(s_1^*), \dots].$$

Ανάμεσα στα πακέτα που δημιουργούμε στον πομπό, εισάγουμε μηδενικά για να μπορούμε να κάνουμε πιο εύκολα τον διαχωρισμό τους.

Στη συνέχεια, ο κώδικας που τρέχει στην πλατφόρμα της python, χρησιμοποιεί το αρχείο με τα αποθηκευμένα δεδομένα ως πηγή και ενεργοποιεί τις δύο κεραίες θέτοντας επίσης την τιμή του πολυπλέκτη κατάλληλη για αποστολή μέσω δύο κεραίων. Αφού το αρχείο είναι σωστά δομημένο, η κάθε κεραία θα στέλνει το αντίστοιχο σύμβολο που της έχει δοθεί. Η μετάδοση έγινε στη συχνότητα των $2.45GHz$.

5.1.2 Δέκτης

Στη διάταξη του δέκτη, η αρχική λειτουργία είναι ο διαχωρισμός και η αναγνώριση των σωστών πακέτων που έστειλε ο πομπός. Ο εντοπισμός των πακέτων δεδομένων γίνεται με τη βοήθεια κινούμενων παραθύρων.

Εφόσον εντοπιστεί πακέτο, μεταφερόμαστε στην αρχή του παραθύρου του σήματος και ανάλογα με το συντελεστή υπερδειγματοληψίας (over) αποθηκεύουμε τον αντίστοιχο αριθμό δειγμάτων που θα θεωρήσουμε ως πακέτο.

Η ακολουθία που προκύπτει από την παραπάνω διαδικασία περιλαμβάνει δείγματα (samples). Το επόμενο βήμα μας είναι να επιλέξουμε τα σωστά σύμβολα από αυτή την ακολουθία, τα οποία θα αντιστοιχούν στο πακέτο συμβόλων που στείλαμε.

Για το λόγο αυτό υπολογίζουμε την ενέργεια όλων των πακέτων μήκους N και κρατάμε αυτό με τη μεγαλύτερη τιμή ενέργειας. Πάνω στο πακέτο αυτό θα κάνουμε την επεξεργασία για να βγάλουμε τα τελικά αποτελέσματα.

Στην επεξεργασία του σήματος συμπεριλαμβάνεται η εκτίμηση της διαφοράς συχρότητας, η εκτίμηση των τιμών των καναλιών και η ανάκτηση των δεδομένων που έστειλε ο πομπός. Η διαδικασία για την επεξεργασία του σήματος ακολουθεί την ανάλυση του 2ου κεφαλαίου.

Επίσης, υπολογίζεται και το λαμβανόμενο SNR. Για το λόγο αυτό, υπολογίζεται η μέση διασπορά του θορύβου χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που έλαβε ο δέκτης, τις εκτιμήσεις των καναλιών αλλά και όλα τα δεδομένα που στείλαμε (όχι μόνο τα σύμβολα εκπαίδευσης). Η μέση διασπορά του θορύβου υπολογίζεται ως εξής:

$$\sigma_w^2 = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|^2}{N}$$

όπου \hat{y}_i είναι η εκτίμηση των δεδομένων που έλαβε ο δέκτης βασισμένη στην εκτίμηση των καναλιών \hat{h}_1 και \hat{h}_2 και τα σύμβολα s_1 και s_2 :

$$\hat{y}_1 = \hat{h}_1 s_1 + \hat{h}_2 s_2$$

$$\hat{y}_2 = \hat{h}_2 s_1^* - \hat{h}_1 s_2^*$$

⋮

$$\hat{y}_N = \hat{h}_2 s_{N-1}^* - \hat{h}_1 s_N^*.$$

Τέλος το SNR στο δέκτη, μετά τη λήψη όλων των πακέτων, υπολογίζεται ως:

$$\text{SNR} = \frac{\mathcal{E} \left[|\hat{h}_1|^2 + |\hat{h}_2|^2 \right] \mathcal{E} [|s|^2]}{\sigma_w^2}.$$

Μετά την ανάκτηση των δεδομένων, το κάθε πακέτο συγκρίνεται με τα δεδομένα που στάλθηκαν απο τον πομπό και υπολογίζονται τα σφάλματα.

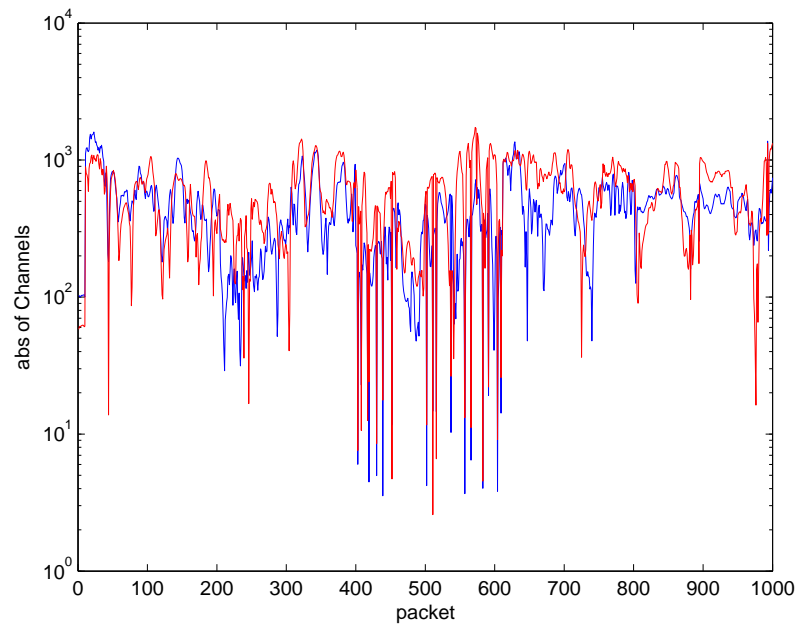
5.1.3 Αποτελέσματα πειραμάτων

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο χώρο του εργαστηρίου για διάφορες τιμές ισχύος του εκπεμπόμενου σήματος. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται διαγράμματα για 2 τιμές ισχύος (μία σχετικά υψηλή και μία σχετικά χαμηλή) σε περιπτώσεις που υπήρχε κίνηση στο χώρο (άλλα άτομα ή κίνηση του δέκτη) αλλά και σε περιπτώσεις όπου εκτός των αντικειμένων του εργαστηρίου δεν υπήρχαν άλλες παρεμβολές. Η διαμόρφωση των συμβόλων είναι 4-QAM.

Κίνηση στο χώρο, $SNR = 24.08 \text{ db}$.

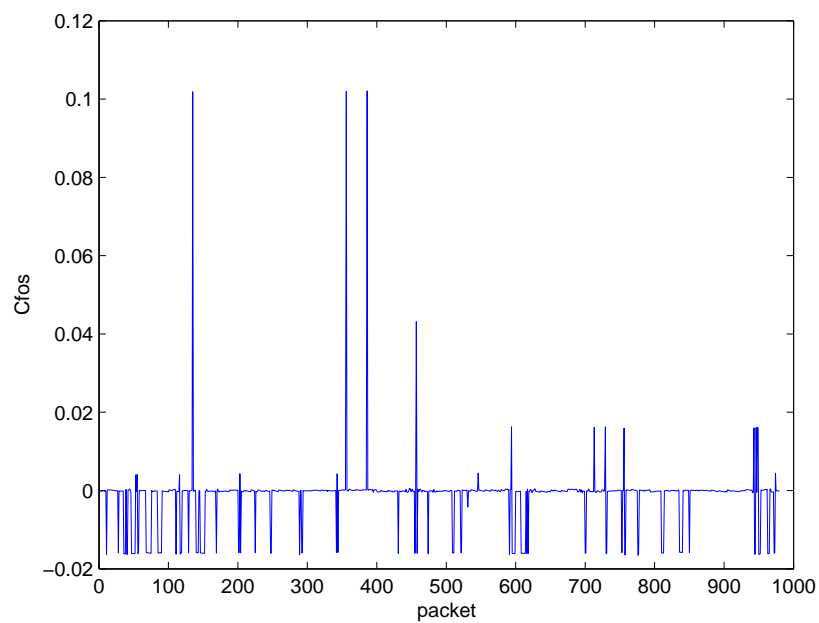
Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζονται οι τιμές του μέτρου των καναλιών για όλα τα πακέτα μετάδοσης στην περίπτωση της έντονης κινητικότητας στο χώρο.

Στο σχήμα αυτό παρατηρούμε μία έντονη μεταβολή στις τιμές του μέτρου για τα δύο κανάλια. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι υπήρχε κίνηση στο χώρο.

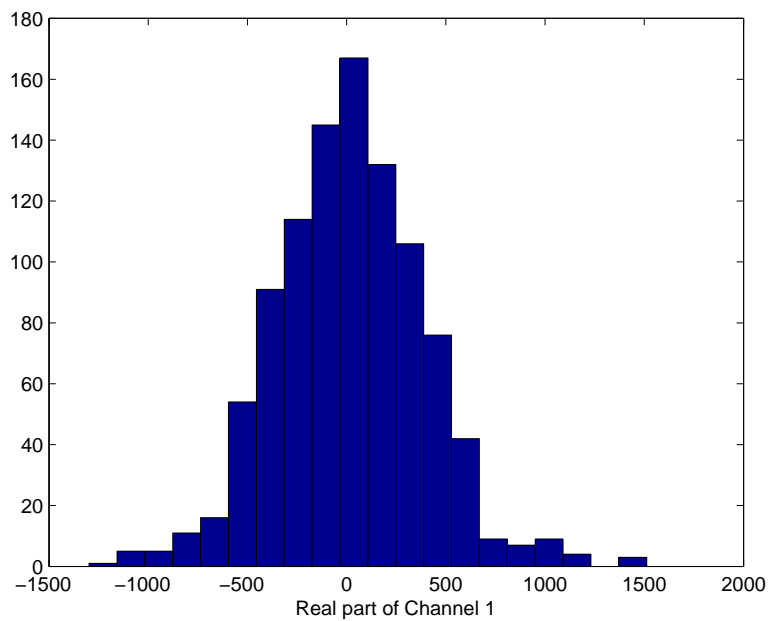


Σχήμα 5.1: Το μέτρο των καναλιών για όλα τα πακέτα

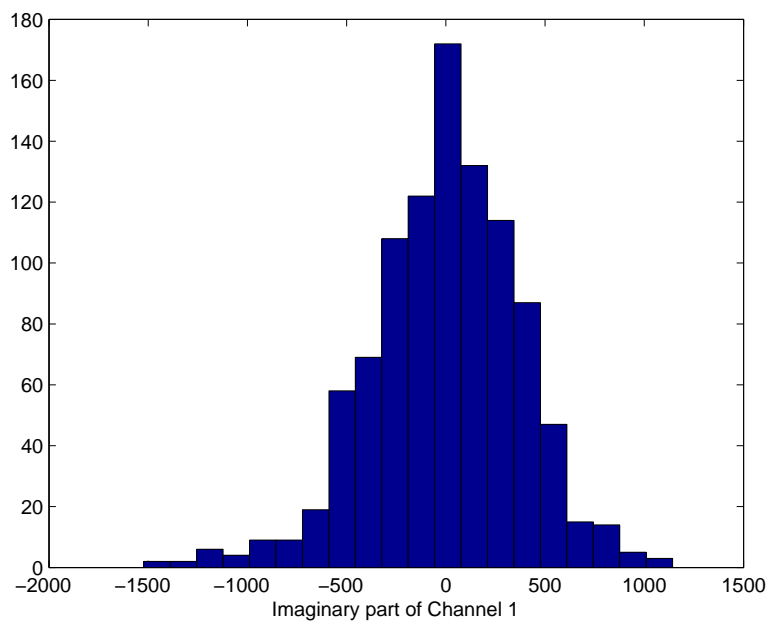
Στο σχήμα 5.2 παρατίθενται οι τιμές της διαφοράς συχνότητας του φορέα.



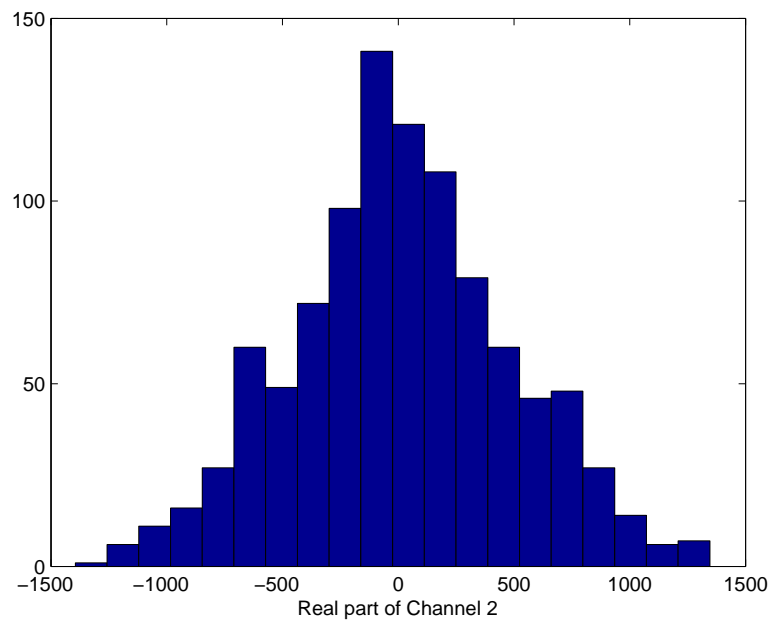
Σχήμα 5.2: Διαφορά συχνότητας φορέα



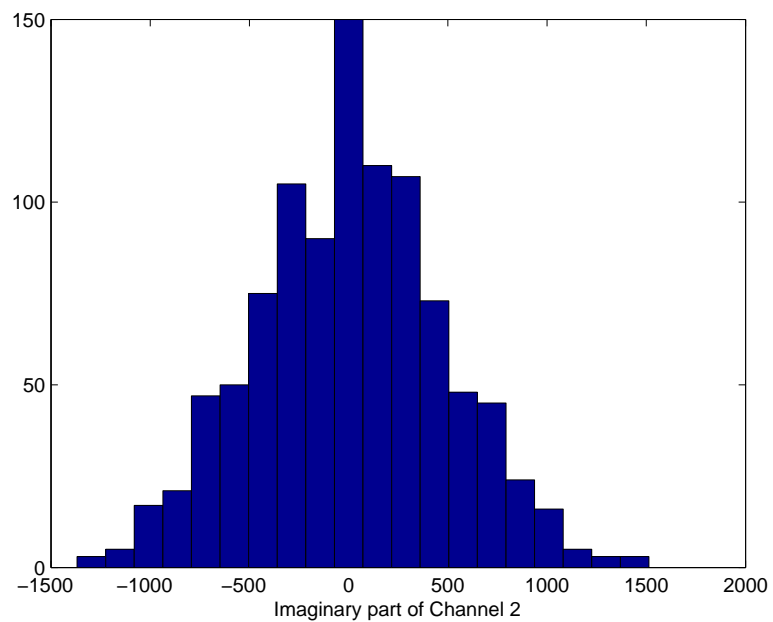
Σχήμα 5.3: Ιστόγραμμα κατανομής πραγματικών τιμών του καναλιού 1



Σχήμα 5.4: Ιστόγραμμα κατανομής φανταστικών τιμών του καναλιού 1



Σχήμα 5.5: Ιστόγραμμα κατανομής πραγματικών τιμών του καναλιού 2

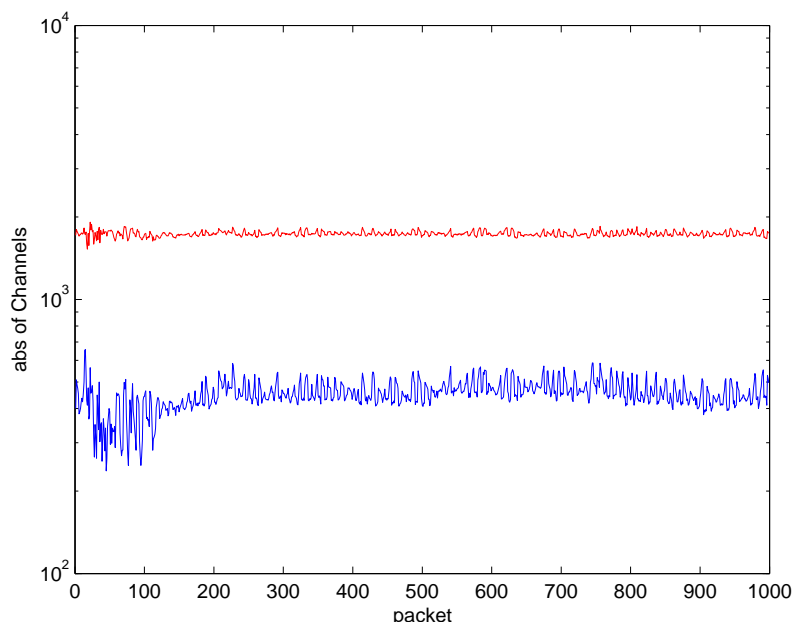


Σχήμα 5.6: Ιστόγραμμα κατανομής φανταστικών τιμών του καναλιού 2

Στα σχήματα 5.3, 5.4, 5.5 και 5.6 παρουσιάζεται ο τρόπος κατανομής των τιμών του καναλιού 1 και του καναλιού 2. Σε περιπτώσεις, όπως και αυτή, όπου έχουμε έντονη κινητικότητα τα αντικείμενα που δημιουργούν την κίνηση (π.χ. άνθρωπος) δημιουργούν και έναν μεγάλο αριθμό στατιστικά ανεξάρτητων ανακλώμενων και σχεδάζομενων διαδρομών. Τότε τα κανάλια ακολουθούν κατανομή Rayleigh και οι τιμές τους είναι κυκλικές συμμετρικές μιγαδικές Gaussian τυχαίες μεταβλητές.

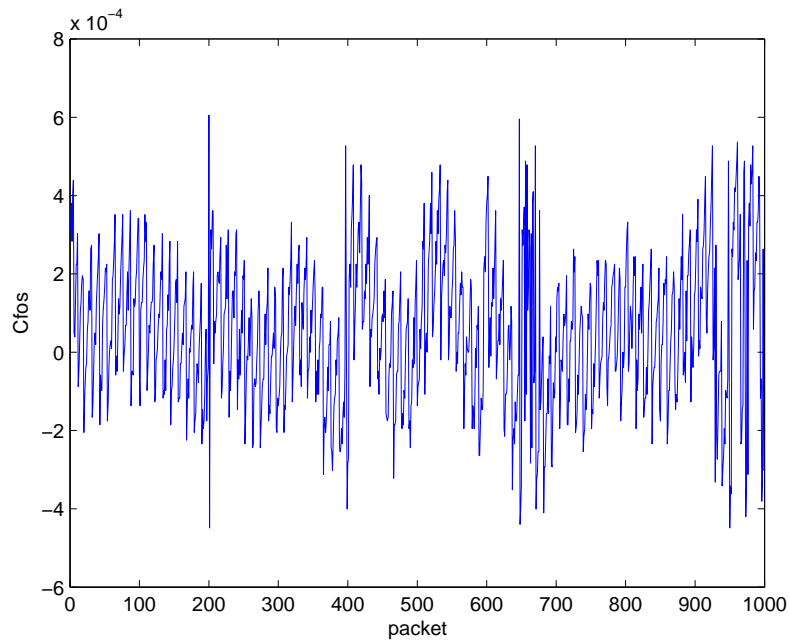
Χωρίς κίνηση στον χώρο, $SNR = 23.86$ db.

Στο σχήμα 5.7 παρουσιάζονται οι τιμές του μέτρου των καναλιών για όλα τα πακέτα μετάδοσης στην περίπτωση που δεν υπήρχε καθόλου κινητικότητα στο χώρο.



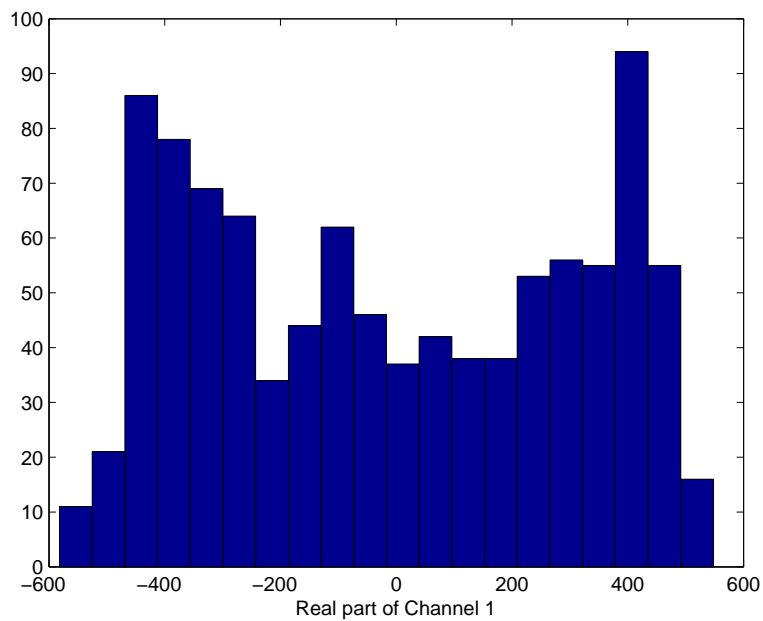
Σχήμα 5.7: Το μέτρο των καναλιών για όλα τα πακέτα

Στο σχήμα αυτό δεν εμφανίζεται έντονη μεταβολή στις τιμές του μέτρου για τα δύο κανάλια. Το γεγονός ότι δεν υπάρχει κίνηση στο χώρο σημαίνει ότι οι πολλαπλές διαδρομές δεν μεταβάλλονται γρήγορα στο χρόνο.

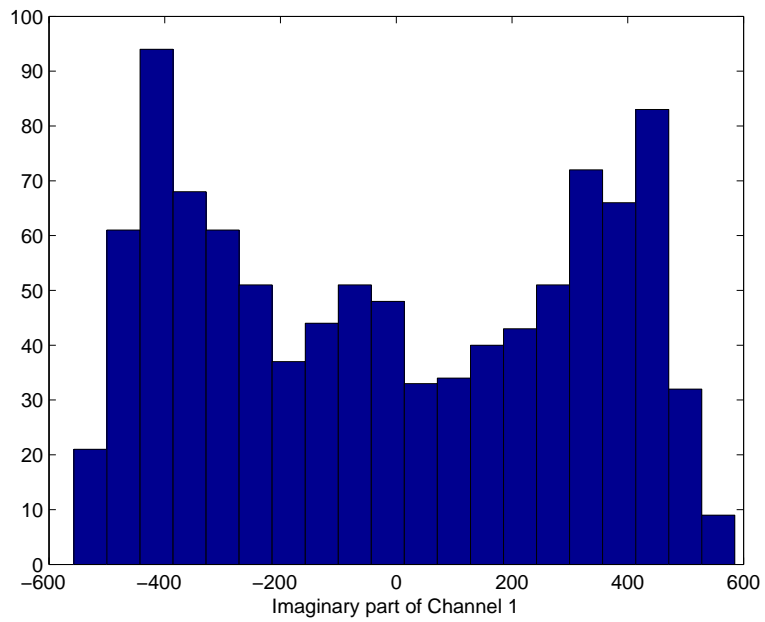


Σχήμα 5.8: Διαφορά συχνότητας φορέα

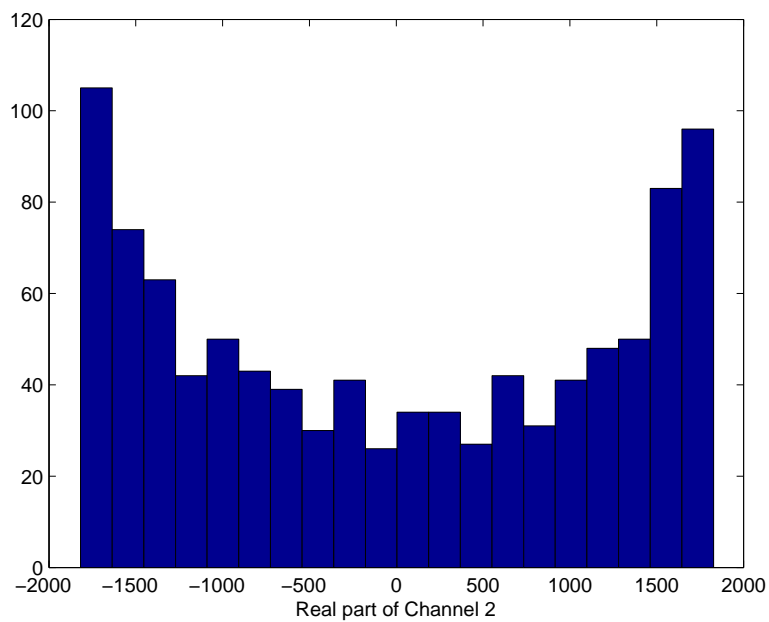
Στο σχήμα 5.8 παρατίθενται οι τιμές της διαφοράς συχνότητας του φορέα.



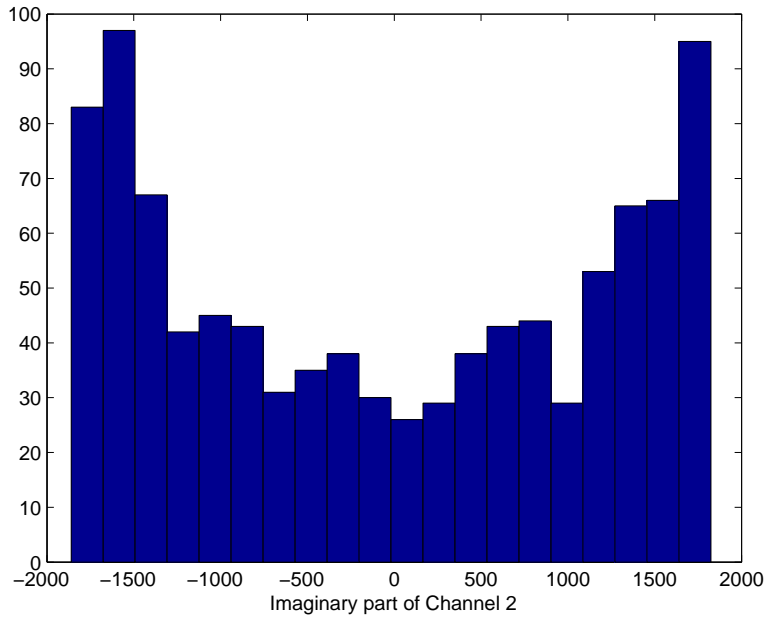
Σχήμα 5.9: Ιστόγραμμα κατανομής πραγματικών τιμών του καναλιού 1



Σχήμα 5.10: Ιστόγραμμα κατανομής φανταστικών τιμών του καναλιού 1



Σχήμα 5.11: Ιστόγραμμα κατανομής πραγματικών τιμών του καναλιού 2

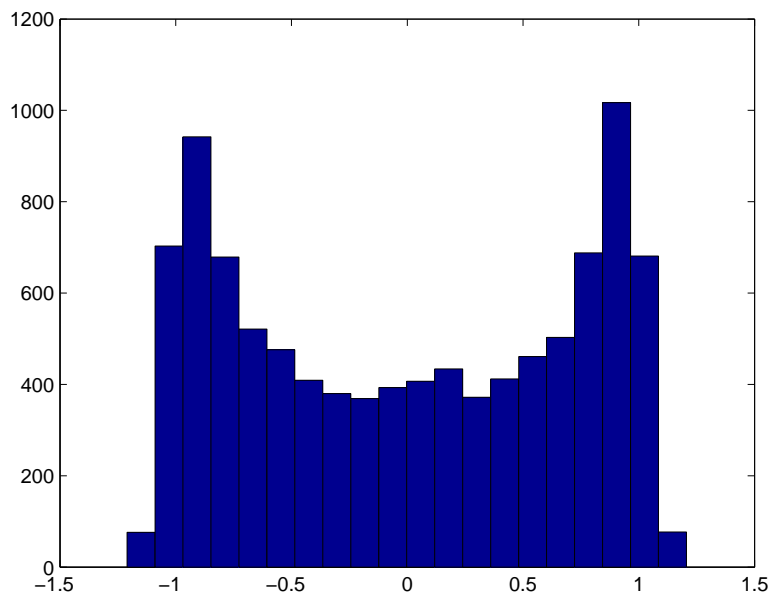


Σχήμα 5.12: Ιστόγραμμα κατανομής φανταστικών τιμών του καναλιού 2

Στα σχήματα 5.9, 5.10, 5.11 και 5.12 παρουσιάζεται ο τρόπος κατανομής των τιμών του καναλιού 1 και του καναλιού 2. Σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει κινητικότητα τα ιστογράμματα είναι διαφορετικά. Η κατανομή των τιμών φαίνεται να δημιουργεί δύο λοβούς σε ίδιες τιμές αντιθέτου προσήμου. Τα κανάλια εδώ ακολουθούν κατανομή Rice και συγκεκριμένα η κατανομή αυτή, μπορεί να μοντελοποιηθεί από την σχέση:

$$h_l[m] = \sqrt{\frac{k}{k+1}} \sigma_l e^{j\theta} + \sqrt{\frac{1}{k+1}} \mathcal{CN}(0, \sigma_l^2), \theta \sim \mathcal{U}(0, 2\pi).$$

Ο πρώτος όρος αναφέρεται στην απευθείας διαδρομή ενώ ο δεύτερος όρος αναφέρεται στις επιμέρους διαδρομές που προκύπτουν από ανάκλαση και σκέδαση. Το k είναι ο λόγος της απευθείας διαδρομής προς τις σχεδαζόμενες διαδρομές. Ο παραπάνω τύπος μπορεί να προσομοιωθεί με χρήση της Matlab για $k = 100$ και $\sigma_l = 1$ και ο τρόπος κατανομής των τιμών h_l απεικονίζεται στο παρακάτω ιστόγραμμα:



Σχήμα 5.13: Κατανομή Rice για $\sigma_l = 1$ και $k = 100$

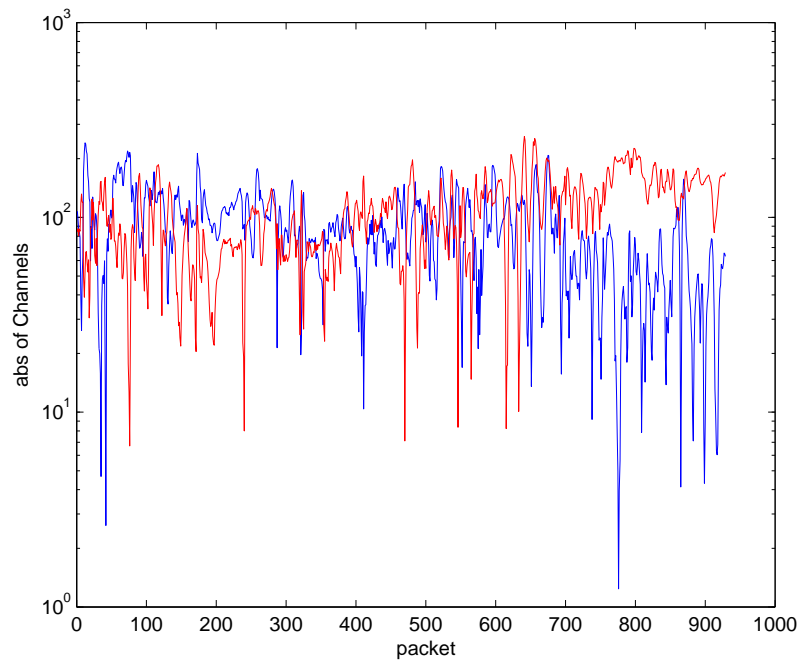
Επομένως, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η κινητικότητα συμβάλλει στην μορφή των καναλιών.

Παρόμοια είναι και τα αποτελέσματα για χαμηλότερες τιμές ισχύος. Αυτά παρουσιάζονται παρακάτω.

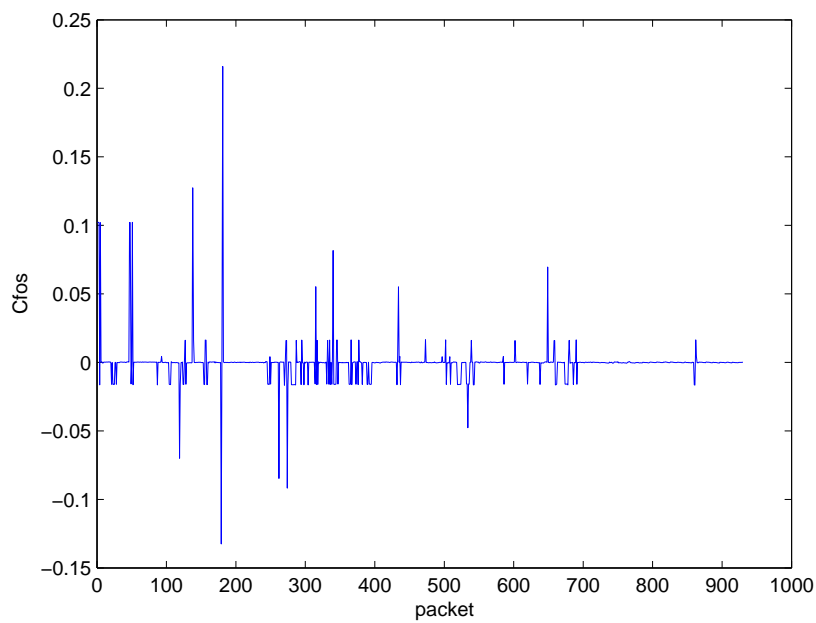
Κίνηση στο χώρο, $SNR = 13.71$ db.

Στο σχήμα 5.14 παρουσιάζονται οι τιμές του μέτρου των καναλιών για όλα τα πακέτα μετάδοσης σε περίπτωση έντονης κινητικότητας στο χώρο.

Στο σχήμα αυτό παρατηρούμε μία έντονη μεταβολή στις τιμές του μέτρου για τα δύο κανάλια όπως και στην προηγούμενη περίπτωση της υψηλής ισχύος εκπομπής με κίνηση στο χώρο.



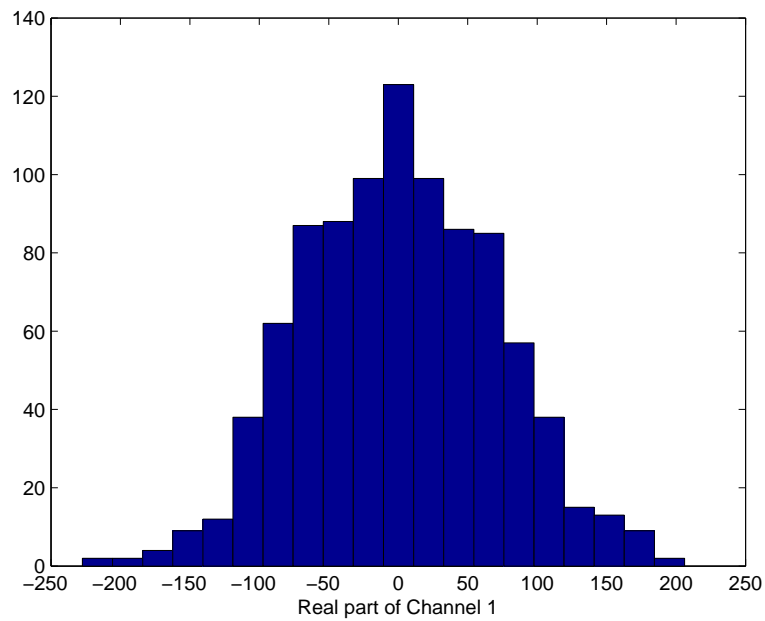
Σχήμα 5.14: Το μέτρο των καναλιών για όλα τα πακέτα



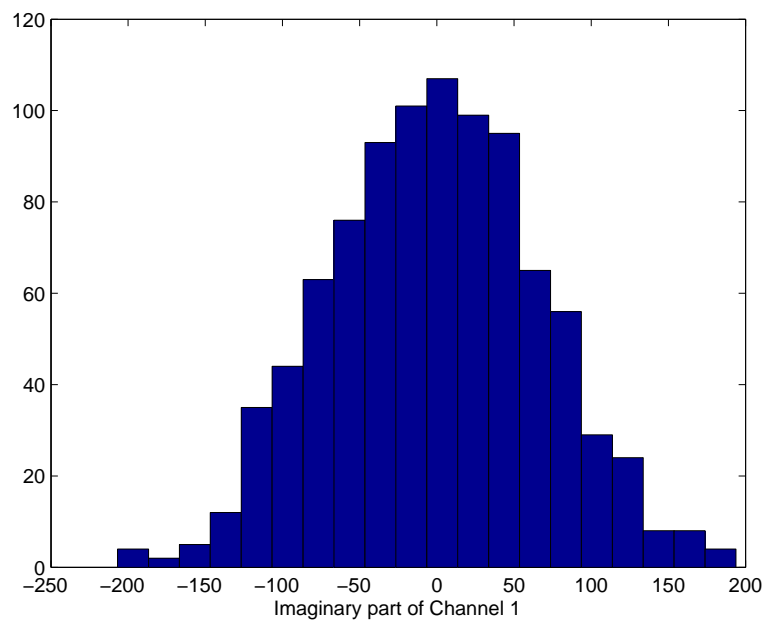
Σχήμα 5.15: Διαφορά συχνότητας φορέα

Στο σχήμα 5.15 παρατίθενται οι τιμές της διαφοράς συχνότητας φορέα για την

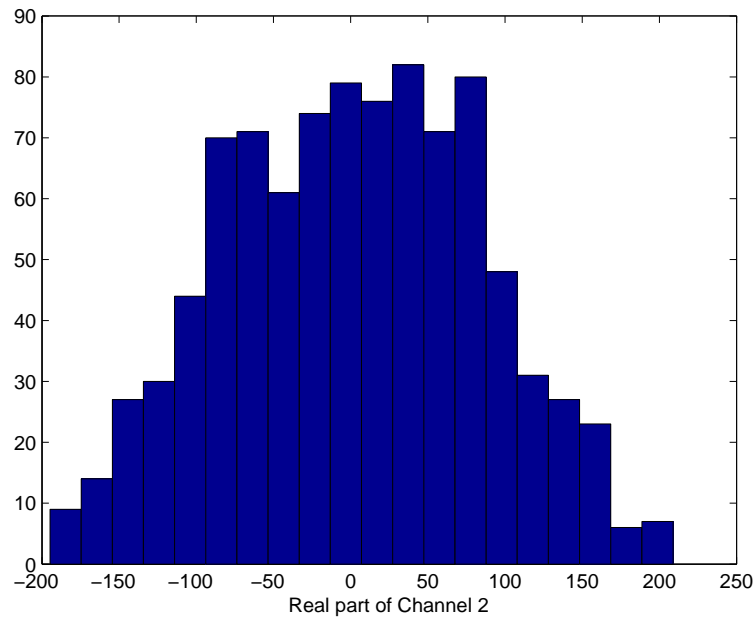
περίπτωση αυτή.



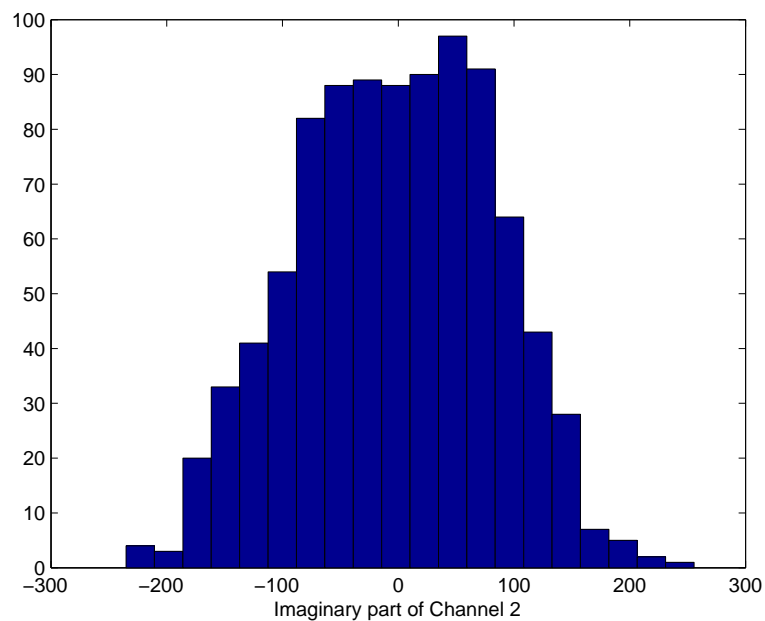
Σχήμα 5.16: Ιστόγραμμα κατανομής πραγματικών τιμών του καναλιού 1



Σχήμα 5.17: Ιστόγραμμα κατανομής φανταστικών τιμών του καναλιού 1



Σχήμα 5.18: Ιστόγραμμα κατανομής πραγματικών τιμών του καναλιού 2



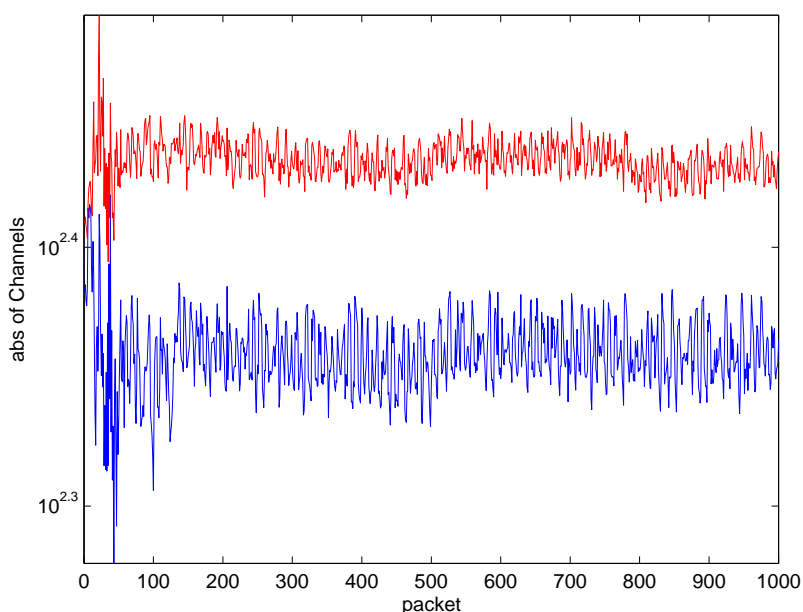
Σχήμα 5.19: Ιστόγραμμα κατανομής φανταστικών τιμών του καναλιού 2

Στα σχήματα 5.16, 5.17, 5.18 και 5.19 παρουσιάζεται ο τρόπος κατανομής των τιμών του καναλιού 1 και του καναλιού 2. Στην περίπτωση αυτή, έχουμε έντονη

κινητικότητα, όπως και προηγουμένως με υψηλότερη ισχύ εκπομπής και τα κανάλια ακολουθούν και πάλι κατανομή Rayleigh. Οι τιμές τους είναι κυκλικές συμμετρικές μιγαδικές Gaussian τυχαίες μεταβλητές.

Χωρίς κίνηση στο χώρο, $SNR = 14.01$ db.

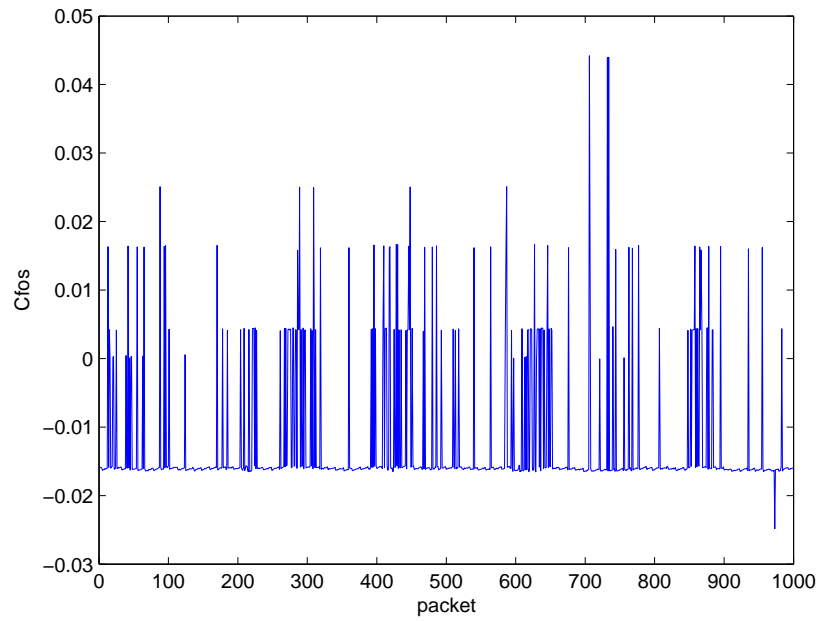
Στο σχήμα 5.20 παρουσιάζονται οι τιμές του μέτρου των καναλιών για όλα τα πακέτα μετάδοσης για την περίπτωση που δεν υπήρχε έντονη κινητικότητα στο χώρο.



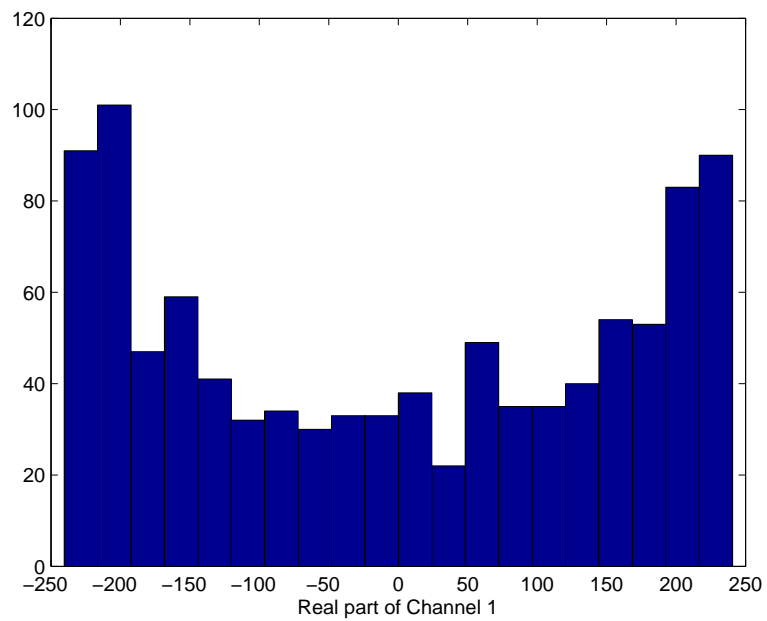
Σχήμα 5.20: Το μέτρο των καναλιών για όλα τα πακέτα

Στο σχήμα αυτό δεν παρατηρούμε έντονη μεταβολή στις τιμές του μέτρου για τα δύο κανάλια και η μορφή του διαγράμματος είναι ίδια με αυτή στην περίπτωση της υψηλής ισχύος εκπομπής χωρίς κίνηση στο χώρο.

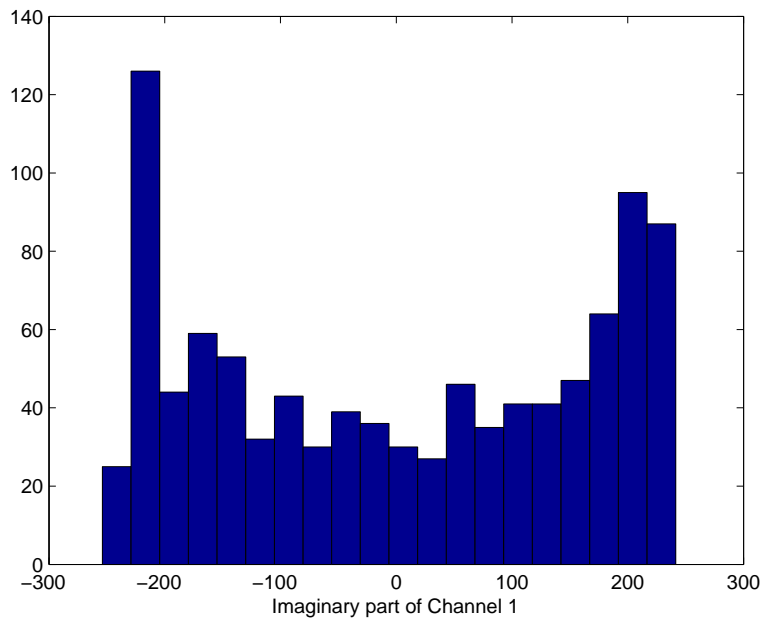
Στο σχήμα 5.21 παρατίθενται οι τιμές της διαφοράς συχνότητας του φορέα. Παρατηρείται ότι υπάρχει μεταβολή των τιμών, η οποία όμως κυμαίνεται σε μικρά επίπεδα.



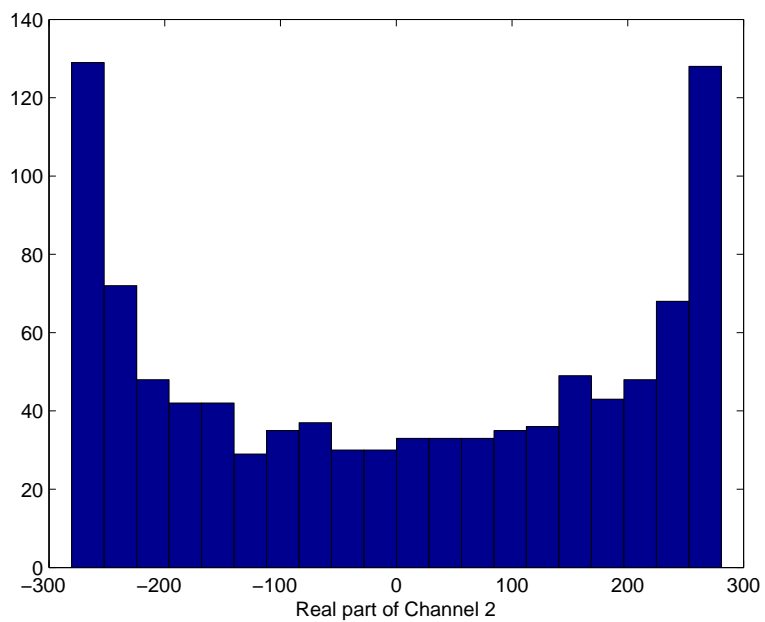
Σχήμα 5.21: Διαφορά συχνότητας φορέα



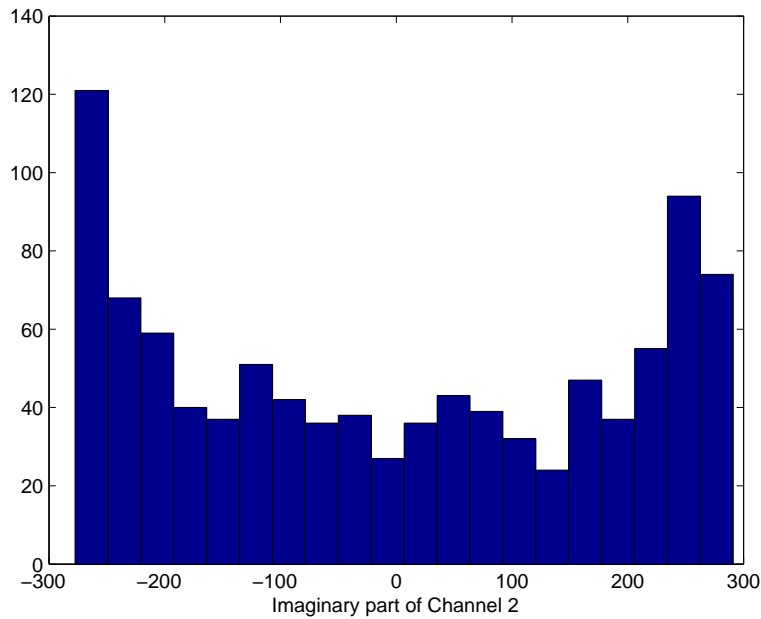
Σχήμα 5.22: Ιστόγραμμα κατανομής πραγματικών τιμών του καναλιού 1



Σχήμα 5.23: Ιστόγραμμα κατανομής φανταστικών τιμών του καναλιού 1



Σχήμα 5.24: Ιστόγραμμα κατανομής πραγματικών τιμών του καναλιού 2



Σχήμα 5.25: Ιστόγραμμα κατανομής φανταστικών τιμών του καναλιού 2

Στα σχήματα 5.22, 5.23, 5.24 και 5.25 παρουσιάζεται ο τρόπος κατανομής των τιμών του καναλιού 1 και του καναλιού 2. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει έντονη κινητικότητα και τα κανάλια ακολουθούν κατανομή Rice όπως και στην αντίστοιχη περίπτωση με μεγαλύτερη ισχύ.

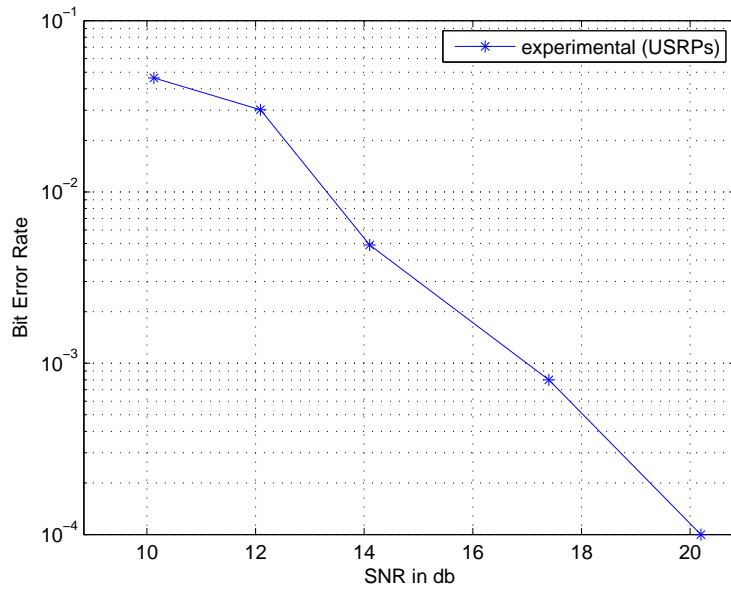
Επιπλέον, με την αλλαγή της κινητικότητας και του τρόπου κατανομής των καναλιών αλλάζει και η συσχέτιση των καναλιών. Η συσχέτιση δηλώνει το πόσο ανεξάρτητα είναι τα κανάλια μεταξύ τους. Οι τιμές για τα παραπάνω πειράματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

	$p = 1000$	$p = 8000$
συσχέτιση - με κίνηση	0.5101	0.6981
συσχέτιση - χωρίς κίνηση	0.99	0.98

Πίνακας 5.1: Πίνακας συσχέτισης καναλιών

Όταν δεν υπάρχει κίνηση στο χώρο τα κανάλια έχουν υψηλό βαθμό συσχέτισης, ενώ όταν υπάρχει κίνηση τα κανάλια τείνουν να γίνουν ανεξάρτητα.

Τέλος, μπορούμε να παρατηρήσουμε την απόδοση του συστήματος που υλοποιήσαμε παρουσιάζοντας την καμπύλη BER, για μία σειρά πειραμάτων (σχήμα 5.26).



Σχήμα 5.26: Πειραματικό BER στα USRPs

Τα πειράματα διεξήχθησαν στο χώρο του εργαστηρίου διατηρώντας σταθερή τη θέση των USRPs αλλάζοντας κάθε φορά την τιμή ισχύος εκπομπής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα κανάλια ακολουθούν Rice κατανομή.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Στόχος της εργασίας, ήταν η υλοποίηση του σχήματος του Alamouti με τη χρήση ενός software-defined συστήματος επικοινωνίας αλλά και η κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του συστήματος σε διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης.

Παρατηρήσαμε ότι τα κανάλια συμπεριφέρονται διαφορετικά στις περιπτώσεις με κίνηση στο χώρο και διαφορετικά στις περιπτώσεις χωρίς κίνηση στο χώρο. Ωστόσο και στις δύο περιπτώσεις το σύστημα λειτουργεί αποδοτικά, κρατώντας τον αριθμό των σφαλμάτων σε πολύ χαμηλές τιμές.

Μελλοντικά, θα μπορούσε να υλοποιηθεί το σχήμα του Alamouti για συστήματα με 2 κεραίες εκπομπής και 2 κεραίες λήψης, αυξάνοντας την τάξη διαφοροποίησης στο διπλάσιο, να μελετηθεί η συμπεριφορά του συστήματος αυτού αλλά και να συγκριθεί με την περίπτωση που μελετήσαμε στην παρούσα εργασία.

Βιβλιογραφία

- [1] David Tse, Pramod Viswanath, *Fundamental of Wireless Communication*, Cambridge Univeristy Press, 2005.
- [2] Αθανάσιος Π. Λιάβας, *Εισαγωγή στις Ασύρματες Επικοινωνίες*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα ΗΜΜΥ, Δεκέμβριος 2009.
- [3] Michele Morelli, Umberto Mengali, “Carrier-Frequency Estimation for Transmissions over Selective Channels”, *IEEE Transactions on communications*, Vol.48, No.9, pp. 1580-1581, September 2000
- [4] Siavash M. Alamouti, “A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications”, *IEEE Journal on select areas in communications*, Vol.16, No.8, pp.1451-1458, October 1998.
- [5] Eric Blossom, *Exploring GNU Radio*,
<http://www.gnu.org/software/gnuradio/doc/exploring-gnuradio.html>
- [6] Matt Ettus, *USRP User's and Developer's Guide*,
http://www.olifantasia.com/gnuradio/usrp/files/usrp_guide.pdf
- [7] Christopher Bowick, *What's in an RF Front End?*,
<http://www.eetimes.com/design/analog-design/4018954/What-s-in-an-RF-Front-End->